

**Є. М. Панов
С. В. Лелека
А. Я. Карвацький
І. О. Мікульонок**

**ЕНЕРГОРЕСУРСОЕФЕКТИВНЕ
ВИРОБНИЦТВО
ІЗОСТАТИЧНОГО ГРАФІТУ**

Монографія

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

УДК 621.365.32-032.36
Е62

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
(Протокол № 5 від 30.06.2020 р.)*

Рецензенти:

Б. І. Бондаренко, д-р техн. наук, акад. НАН України,
Інститут газу Національної академії наук України
А. А. Топоров, канд. техн. наук, доц., Донецький
національний технічний університет

Е62 Енергоресурсоефективне виробництво ізостатичного графіту :
монографія / Є. М. Панов, С. В. Лелека, А. Я. Карвацький, І. О.
Мікульонок. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 141 с.: іл. Бібліогр.:
С. 128–138. 300 прим.

ISBN 978-617-7734-26-9

У монографії розглянуто наукові засади теоретично-експериментальних досліджень фізичних полів у термічних процесах виробництва ізостатичного графіту з метою розробки енергоресурсоефективних технологічних регламентів та обладнання його виробництва.

Запропоновано шляхи підвищення ефективності конструкцій і регламентів експлуатації пічного електротермічного обладнання термообробки заготовок ізостатичного графіту з поліпшеними показниками енергоефективності та якості готового продукту.

Для фахівців хімічного машинобудування та споріднених галузей виробництва, а також викладачів, аспірантів і студентів інженерно-хімічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 621.365.32-032.36

ISBN 978-617-7734-26-9

© Є. М. Панов, С. В. Лелека,
А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонок, 2020
© КПІ ім. Ігоря Сікорського (ІХФ), 2020

ВСТУП

Завдяки унікальному поєднанню механічних, хімічних і теплофізичних властивостей графітові матеріали набули широкого застосування в різних галузях промисловості. На виробництві використовують як природний, так і штучний графіт, останній з яких вирізняється високою чистотою. Штучний графіт за способом виготовлення, подальшого місця його використання, експлуатаційних умов поділяється на велику кількість різновидів та марок. Ізостатичний графіт представляє собою окремий унікальний тип графітового матеріалу, який відрізняється від інших видів штучного графіту кращими фізичними властивостями та їхньою ізотропністю по всій структурі. Деталі з цього матеріалу за багатьма характеристиками міцності близькі до сталевих, а за електро- та теплопровідністю зберігають всі переваги графіту. У деяких галузях промисловості такий матеріал майже незамінний. Наприклад, електроди з ізостатичного графіту в електроерозійних верстатах дають змогу мало не на порядок збільшити точність металообробки.

Ізостатичний графіт представляє собою дрібнозернистий графіт, який отримують за високого тиску методом ізостатичного пресування. З цього матеріалу виготовляють вироби складної форми з високою чистотою обробки поверхні. Для потреб металургійної промисловості з ізостатичного графіту виготовляються ливарні кокілі, плавильні тиглі, кристалізатори, воронки, жолоби тощо. В електротехнічній галузі з цього матеріалу виготовляють елементи електровакуумних приладів, контейнери для виробництва напівпровідників, сітки для випрямлячів з ртуті, аноди. Ізостатичний графіт є незамінним конструкційним матеріалом реакторів атомних електростанцій, сонячних фотоелектричних елементів тощо.

Розробка технології виробництва ізостатичного графіту ведеться провідними виробниками на ринку з виготовлення штучного графіту ще з 1960-х років минулого століття. У пострадянських країнах та Україні зокрема цим перспективним напрямком вітчизняні виробники зацікавилися після 2006 року, тобто в час швидкого зростання глобальної фотоелектричної промисловості. Таке швидке зростання призвело до дефіциту перспективного графітового матеріалу на світовому ринку з виробництва штучного графіту. З того часу провідні виробники займаються постійним розширенням асортименту ізостатичного графіту та удосконалюванням технології його виробництва.

З огляду на викладене дослідження та вдосконалення технології виробництва продукції з ізостатичного графіту є безперечно актуальним завданням.

Виконані авторами дослідження ґрунтуються на комплексному підході, що включає проведення відповідних експериментальних та теоретичних досліджень. Експериментальні дослідження включають: дані з фізичних властивостей заготовок ізостатичного графіту, які є необхідними для верифікації розроблених числових моделей фізичних полів обладнання та виконання числового аналізу нових і модернізованих конструкцій устаткування та режимів експлуатації. Теоретичні дослідження включають: розробку на

підставі фізичних уявлень про процеси, що проходять під час випалювання і графітування електродних заготовок ізостатичного графіту, що ґрунтується на системах рівнянь механіки суцільного середовища, розробку відповідних твердотільних і числових моделей пічного обладнання на базі вільного відкритого програмного коду OpenFOAM та авторського програмного забезпечення з використанням експериментальних даних у вигляді фізичних властивостей та початкових і граничних умов для проведення числового аналізу теплоелектричних полів з метою визначення раціональних конструкцій та регламентів експлуатації промислового обладнання.

У результаті проведених досліджень розроблено: нову технологію отримання ізостатичного графіту, а також сформульовано рекомендації щодо вибору сировинної бази, технологічних регламентів устаткування та технічних рішень стосовно модернізації діючого обладнання; алгоритм розв'язання оберненої коефіцієнтної задачі теплопровідності на базі градієнтного методу, який застосовано для відновлення теплофізичних властивостей наповнювача різного гранулометричного складу; модифікації неявного алгоритму розв'язання задачі пружно-пластичної поведінки сипкого матеріалу – наповнювача, який можна застосовувати для відпрацювання режимів ізостатичного пресування; фізичні й математичні моделі процесів високотемпературного оброблення ізотропного вуглецевого матеріалу на етапах його випалювання і графітування. Крім того, отримано експериментальні дані з температурних залежностей фізичних властивостей ізостатичного графіту на основних технологічних стадіях його виробництва, а також визначено закономірностей впливу габаритних розмірів виробів ізостатичного графіту на технологічні режими його оброблення.

Основним результатом проведених досліджень є розробка енергоефективних технічних рішень для промислової реалізації технології виробництва ізостатичного графіту.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

a –	коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$; швидкість звуку, $\text{м}/\text{с}$;
A –	амплітуда, м
$\mathbf{b} = b_i \mathbf{e}_i$,	
$i = 1, 2, 3$ –	вектор масових гравітаційних сил, $\text{Н}/\text{кг}$;
\dot{b}_i –	компоненти вектора приросту гравітаційних масових сил, $\text{Н}/\text{кг}$;
C –	сила зчеплення між гранулами сипкого матеріалу, Па ;
c_p –	масова ізобарна теплоємність, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;
C^{ijkl} –	компоненти тензора 4-го рангу пружності, Па ;
$\hat{\mathbf{C}}^4$ –	тензор пружних констант 4-го рангу, Па ;
$[C^{(e)}]$ –	матриця СЕ, що пов'язана з демпфіруванням;
C_i –	концентрація летких у пробах;
C_0 –	середня концентрація летких;
d_{002} –	середня відстань між шарами графіту в кристалі, м ;
d –	об'ємна густина графітового матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$;
d_p –	рентгенівська густина графіту, $\text{кг}/\text{м}^3$;
D –	діаметр ротора, м ;
E –	модуль пружності під час одновісного випробування, ГПа ; повна масова енергія, $\text{Дж}/\text{кг}$; енергія активації, $\text{Дж}/\text{моль}$;
\mathbf{E} –	вектор напруженості електричного поля, $\text{В}/\text{м}$;
$\{f_j^{(e)}\}$ –	вектор навантаження СЕ за рахунок заданої густини електричного струму на границі $\Gamma_{U\Pi}$ частини поверхні Ω , $\text{А}/\text{м}^3$;
F –	функція поверхні текучості сипкого матеріалу;
$\mathbf{F}_P = F_i^P \mathbf{e}_i$,	
$i = 1, 2, 3$ –	вектор зовнішньої сили в точці P , Н ;
F_s –	запас міцності;
G_k –	джерельний член для k , $\text{Вт}/\text{м}^3$;
G_b –	джерельний член для k , який пов'язаний із виштовхувальною силою, $\text{Вт}/\text{м}^3$;
h –	крок інтегрування за координатою, м ; масова ентальпія, $\text{Дж}/\text{кг}$;
$\{\hat{h}^{(e)}\}, \{h^{(e)}\}$ –	вектори об'ємної ентальпії СЕ на верхньому та нижньому часових рівнях, відповідно, $\text{Дж}/\text{м}^3$;
H –	повна об'ємна ентальпія, що враховує теплоту випаровування або конденсацію води, або теплоту сублімації вуглецевмісних матеріалів печі, $\text{Дж}/\text{м}^3$;
I –	енергонавантаження вібротина, Дж ; сила струму на центральному нагрівнику, $\text{А}/\text{м}^2$;

$I(\mathbf{s})$ –	інтенсивність випромінювання (Вт·с/(м ² ·ср)) в напрямку \mathbf{s} (м) у тілесному куті $d\Omega$;
$\hat{\mathbf{I}}$ –	одиничний тензор другого рангу;
j_n –	нормальна густина електричного струму, А/м ² ;
\mathbf{j} –	вектор густини електричного струму, А/м ² ;
k –	турбулентна кінетична енергія, Дж/кг; передекспоненційний множник, с ⁻¹ ;
K –	коефіцієнт поглинання, м ⁻¹ ;
K_3 –	коефіцієнт неоднорідності змішування;
$[K_\lambda^{(e)}(\hat{T})]$, $[K_\alpha^{(e)}(\hat{T})]$ –	матриці СЕ, що пов'язані з теплопровідністю (Вт/(м ³ ·К)) та зовнішнім конвективним теплообміном (Вт/(м ³ ·К)), відповідно;
$[K_\chi^{(e)}(\hat{T})]$ –	матриця СЕ, що пов'язана з електропровідністю, См/м ³ ;
l –	довжина центрального нагрівника, м;
L_a –	середній діаметр кристаліту, м;
L_c –	середня висота кристаліту, м;
L_{f6}, L_{fc} –	масова теплота фазового переходу під час випаровування води та сублімації графіту, відповідно, Дж/кг;
m –	маса подрібнювальних тіл, кг;
m_{vapor} –	маса водяної пари, яка вступила в реакцію газифікації, кг;
$m_{\text{all.vapor}}$ –	маса водяної пари, що пройшла крізь зону газифікації, кг
M –	кількість СЕ;
n –	частота обертання, хв ⁻¹ ; загальна кількість проб; показник заломлення;
$\mathbf{n} = n_i \mathbf{e}_i$, $i = 1, 2, 3$ –	вектор зовнішньої нормалі до поверхні тіла;
N –	кількість кроків навантаження;
p –	зовнішній тиск, Па;
q –	продуктивність млина, кг/с; густина теплового потоку, Вт/м ² ;
q_{elec} –	джерело теплоти, що виділяється за рахунок проходження електричного струму крізь нагрівники печі, Вт/м ³ ;
q_l –	лінійна густина теплового потоку, Вт/м;
$q_{\text{v chem}}$ –	густина внутрішнього джерела теплоти, що пов'язана з хімічними реакціями, Вт/м ³ ;
$q_{\text{v devapor}}$ –	густина внутрішнього джерела теплоти, що враховує тепломасоперенесення водяної пари та її конденсацію, Вт/м ³ ;
q_{volat} –	теплота утворення летких у заготовках ІГ, Вт/м ³ ;
\mathbf{q}_r –	вектор густини радіаційного теплового потоку, Вт/м ² ;
$Q_{\text{r.g}}$ –	тепловий ефект хімічних реакцій газифікації, Дж/кг;
r –	радіус, м;
r_e –	контактний електричний опір, Ом·м ² ;

$r_q, r_t \in (r_1, r_2)$	– радіальні координати, в яких визначаються густина теплового потоку й температура всередині циліндричного шару, відповідно, м;
r_λ	– контактний термічний опір, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$;
R	– універсальна газова стала, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; радіус заготовки, м;
s_{ij}	– компоненти тензора девіаторних напружень, Па;
S_{su}	– поверхня симетрії тіла, м^2 ;
S_u	– поверхня (або точка поверхні), на якій задано переміщення, м^2 ;
$\hat{\mathbf{S}}$	– тензор другого рангу швидкості деформації, с^{-1} ;
t	– температура, $^\circ\text{C}$; час, с;
T	– абсолютна температура, К^{-1} ;
T_{eq}	– рівноважна температура випаровування, або сублімації (фазового переходу першого роду) або хімічної реакції, К;
$\{\hat{T}^{(e)}\}, \{T^{(e)}\}$	– вектори абсолютної температури СЕ на верхньому та нижньому часових рівнях, відповідно, К;
$\mathbf{u} = u_i \mathbf{e}_i$,	
$i = 1, 2, 3$	– вектор переміщення, м;
\dot{u}_i	– компоненти вектора приросту переміщення, м;
u_s	– результуюче переміщення, м;
U	– різниця електричного потенціалу на центральному нагрівнику, В;
$\{\hat{U}^{(e)}\}$	– вектор електричного потенціалу СЕ на верхньому часовому рівні, В;
$\{\nabla \hat{U}^{(e)}\}$	– градієнт електричного потенціалу СЕ, В/м;
\mathbf{v}	– вектор швидкості, м/с;
V_{gasific}	– об'єм зони газифікації вуглецевмісного матеріалу, м^3 ;
$\mathbf{x} = x_i \mathbf{e}_i$,	
$i = 1, 2, 3$	– вектор декартових координат, м;
$X(x, y, z) \in \Omega$	– декартові координати, м;
Y_M	– джерельний член для k , що враховує стисливість середовища, $\text{Вт}/\text{м}^3$;
α	– КТР матеріалу, К^{-1} ;
α_{eff}	– ефективний коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
β	– ширина половини висоти амплітуди відповідного дифракційного піку, м; коефіцієнт лінійного температурного розширення, К^{-1} ;
γ	– кут дилатансії, рад; показник адіабати;
δ_{ij}	– символ Кронекера;
δ_c	– середній розмір частинок, мкм;
δ_q, δ_t	– похибки визначення модельних значень густини теплового потоку й температури, відповідно;
τ	– час, с;

τ_{gasific} –	тривалість процесу газифікації, с
$\Delta \varepsilon_{kl}^{pl}$ –	компоненти тензора приросту пластичної деформації на i -му кроці навантаження;
ΔS_p –	елементарна площадка поверхні тіла в околі точки P , м ² ;
Δt –	радіальний перепад температури заготовки, °С;
ΔT –	температурний інтервал згладжування, К;
$\Delta \tau$ –	крок інтегрування за часом, с;
$\bar{\tau}_{eff}$ –	тензор девіаторних напружень, Па;
Δt –	радіальний перепад температури заготовки, °С;
ε –	повна пористість матеріалу; швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії, Дж/(кг·с);
$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_{ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j$,	
$i, j = 1, 2, 3$ –	симетричний тензор другого рангу пружних деформацій;
ε_{ij}^e –	компоненти тензора малих пружних деформацій Коші;
$\dot{\varepsilon}_{ij}^{el}, \dot{\varepsilon}_{ij}^{pl}$ –	пружна і пластична складові тензора приросту повних деформацій $\dot{\varepsilon}_{ij}$, відповідно;
ε_{ij}^T –	компоненти тензора температурних деформацій;
ε_{kl}^{tr} –	компоненти тензора пробних (повних) деформацій 2-го рангу;
$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_{ijk} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j \mathbf{e}_k$ –	тензор 3-го рангу Levi-Civita;
ε_T –	задана точність розрахунку поля температури, К;
θ –	кут між нормальми до вуглецевих шарів і напрямком бажаної орієнтації, рад;
λ –	коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);
λ_p –	довжина хвилі рентгенівського випромінювання, м;
μ –	динамічна в'язкість, Па·с;
μ_t –	турбулентна в'язкість, Па·с;
ν –	частота, с ⁻¹ ; коефіцієнт Пуассона;
$\xi_{\text{evac.g}}$ –	коефіцієнт, що враховує випаровування водяної пари в навколишнє середовище;
π –	число Пі;
ρ –	густина, кг/м ³ ;
σ –	стала Стефана–Больцмана, Вт/(м ² ·К ⁴);
$\hat{\sigma} = \sigma_{ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j$,	
$i, j = 1, 2, 3$ –	симетричний тензор напруження другого рангу, Па;
$\hat{\sigma}^{tr}$ –	тензор пробних напружень, що визначається в наближенні пружного середовища, Па;
σ_1, σ_3 –	головні максимальне та мінімальне напруження, відповідно, Па;
σ_{eqDP} –	еквівалентне напруження за Дукером–Прагером, Па;

σ_{eqM} –	еквівалентне напруження за критерієм Мора, Па;
$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ –	компоненти тензора термічного напруження для радіального, тангенціального і осового напрямків, відповідно, Па;
σ_m –	середнє гідростатичне напруження, Па;
$[\sigma^+] = \sigma_p^*$ –	границя міцності під час стискання, МПа;
$[\sigma^-] = \sigma_c$ –	границя міцності під час розтягу, МПа;
$\dot{\sigma}_{ij}$ –	компоненти симетричного тензора приросту напруження 2-го рангу, Па;
$\dot{\sigma}_{ij}^0$ –	компоненти тензора приросту початкового напруження, Па;
$\sigma_y(c, \varphi)$ –	границя текучості сипкого матеріалу, Па;
τ –	час, с;
$\bar{\mathbf{t}}_{eff}$ –	тензор девіаторних напружень, Па;
\square –	кут відбиття, що визначається положенням зйомки, рад;
φ –	кут внутрішнього тертя або кут природного укосу сипкого матеріалу, рад.
χ –	коефіцієнт електропровідності матеріалу нагрівника, См;
χ_\perp –	ДМС у напрямку, перпендикулярному осі текстури, м ³ /кг;
χ_\parallel –	ДМС у напрямку, паралельному площині шару, м ³ /кг;
ω –	швидкість зіткнення частинок у момент удару, м/с;
$\boldsymbol{\omega}$ –	вектор кутової швидкості, м/с;
Ω –	тілесний кут, ср.

Основні індекси:

$0^-, 0^+$ –	ліворуч і праворуч від температури фазового переходу;
0 –	стосується початкового значення;
cond–	стосується конденсації;
convers–	стосується реакції конверсії оксиду вуглецю та водню;
C –	стосується вуглецю;
eff –	стосується ефективного значення величини;
env.–	стосується оточуючого середовища;
gasific –	стосується газифікації;
t –	стосується турбулентної течії;
vapor –	стосується водяної пари;
v –	стосується води;
z –	стосується графіту.
E –	індекс фізичного експерименту;
M –	індекс модельних даних;
$-$ –	стосується величини, осередненої за Reynolds;
\sim –	стосується величини, осередненої за Favre;
\wedge –	стосується тензора другого рангу.

Інші символи:

(\cdot)	оператор скалярного добутку тензорів;
$(:)$	оператор подвійного скалярного добутку тензорів;
$\text{grad}()$	оператор градієнта тензора;
M_t	турбулентне число Mach;
Pr_t	турбулентне число Prandtl;
$\text{tr}()$	оператор сліду тензора;
∇	оператор Гамільтона (“набла”), м^{-1} ;
\vee	логічне «або»;
\wedge	логічне «і».

Основні скорочення:

ABAQUS	– набір програмного забезпечення для скінченно-елементного аналізу;
ANSYS	– програмні продукти, що дають змогу виконувати числовий аналіз у таких фізичних дисциплінах та інженерних додатках як обчислювальна гідродинаміка, механіка деформованого твердого тіла, електромагнетизм, тепловий аналіз, багатодисциплінарний аналіз;
Gmsh	– вільно відкрите програмне забезпечення для автоматизованої генерації сітки;
Matlab	– пакет прикладних програм для розв’язання задач технічних обчислень;
OpenFOAM	– вільно відкритий програмний код, призначений для виконання CFD-розрахунків;
ParaView	– вільно відкритий програмний код для візуалізації результатів розрахунків;
Python	– мова програмування;
RANS	– осереднені за Reynolds рівняння Navier-Stokes;
ВТП	– високотемпературний пек;
ГМ	– графітові матеріали;
ДМС	– діамагнітна сприйнятливість;
ЕПР	– електронний парамагнітний резонанс;
ОКЗТ	– обернена коефіцієнтна задача теплопровідності;
ІГ	– ізостатичний графіт;
КЕО	– контактний електричний опір;
ККД	– коефіцієнт корисної дії;
КПІ ім. Ігоря Сікорського	– Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
КТР	– коефіцієнт термічного розширення;
МСЕ	– метод скінченних елементів;
МСР	– методом скінченних різниць;
НДС	– напружено-деформований стан;

НДЦ «РТ» –	Науково-дослідний центр «Ресурсозберігаючі технології»
ПВЕ –	КПІ ім. Ігоря Сікорського;
ПЕО –	питомі витрати енергії;
ПрАТ	питомий електричний опір;
«Укрграфіт» –	приватне акціонерне товариство «Український графіт»;
РСА –	рентгеноструктурний аналіз;
СЕ –	скінченний елемент;
СЛАР –	система лінійних алгебричних рівнянь;
СТП –	середньотемпературний пек;
ТВР –	термопара вольфрам-ренієва;
ТХА –	термопара хромель-алюмелева.

1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ З ТЕХНОЛОГІЇ ІЗОСТАТИЧНОГО ГРАФІТУ

1.1. Застосування штучного графіту в сучасній техніці

Графітові матеріали (ГМ) набули широкого застосування в різних галузях промисловості завдяки унікальному поєднанню механічних, хімічних і теплофізичних властивостей [1, 2]. Їх застосовують у металургії, енергетиці, машинобудуванні, на підприємствах військово-промислового комплексу, під час виготовлення вогнетривких матеріалів, електричних машин і установок, фарб, акумуляторних батарей, нагрівників тощо.

Натепер штучний графіт розглядаються як полікристалічний вуглецевий матеріал, що має складну структуру з розгалуженою системою пор [3, 4]. Кристаліти штучних графітів складаються з пакетів вуглецевих шарів, які мають високий ступінь тривимірного впорядкування [5, 6]. Фізико-механічні властивості графіту визначаються особливостями кристалічної структури на мікро- та макрорівнях, які залежать від природи вихідної сировини та технології його виготовлення [7–9].

Причиною широкого застосування штучного графіту є унікальне поєднання фізико-механічних характеристик цього класу матеріалів [1, 2]. По-перше, це висока температура сублімації, що дає можливість графітовим виробам залишатися у твердому стані за температур понад 3000 °С [1, 3, 5]. По-друге, під час нагрівання, на відміну від більшості високотемпературних матеріалів, міцність графіту збільшується [3]. По-третє, оскільки ГМ мають велике значення теплопровідності й низький коефіцієнт термічного розширення [10], то вони також мають і високу стійкість до термічного удару.

Температура експлуатації виробів із штучного графіту на повітрі не перевищує 400 °С, а в інертному середовищі може досягати 2400 °С [2, 11]. Графіт належить до небагатьох матеріалів, які мають високу теплопровідність та відносно низьку електропровідність, що дає змогу використовувати його в термічному обладнанні різного призначення, наприклад, як нагрівники, термоекрани тощо [3, 11].

Високі антифрикційні властивості, стійкість до впливу багатьох агресивних середовищ дає змогу широко використовувати штучний графіт як матеріал для виготовлення хімічної апаратури [3, 11].

Вуглецеві матеріали, в тому числі тонкозернисті графіти, мають низьке значення роботи виходу електронів і здатні до тривалої експлуатації у глибокому вакуумі, тому їх часто використовують як автоелектронні катоди для електронних гармат, нагрівники, джерела світла та плоских дисплейних екранів [12].

Також варто зазначити, що легкість механічної обробки ГМ дає змогу виготовляти графітові деталі найскладніших форм з високою чистотою обробленої поверхні в разі використання стандартного металообробного обладнання [3, 11].

Графіт не є самоспінним матеріалом, оскільки має низькі значення коефіцієнта самодифузії навіть за температур обробки 2000–3000 °С [13]. Класична технологічна схема виробництва штучного графіту включає технологічні операції підготовки вуглецевого наповнювача і в'язучої речовини, змішування композиції, формування заготовок, їх випалювання і графітування [2, 3, 13]. За основу існуючої класифікації сучасних ГМ покладено середній розмір зерен. Розміри зерен штучних графітів зазвичай визначаються розмірами частинок твердого наповнювача. Для грубодисперсних марок графіту середній розмір зерен наповнювача δ_c перевищує 500 мкм [14, 15], для середньодисперсних складає від 150 мкм до 500 мкм [14, 15], для дрібнодисперсних – від 30 мкм до 150 мкм [14]. Середній розмір зерен, розроблених останнім часом марок високоміцних тонкодисперсних марок штучного графіту, становить від 1 мкм до 30 мкм [16].

Тонкодисперсні марки графіту мають кращі фізико-механічні характеристики за мінімальної поруватості. Експлуатаційна стійкість виробів, виконаних з тонкодисперсних ГМ високої густини, в кілька разів перевищує експлуатаційну стійкість виробів, порівняно з виготовленими з середньодисперсних ГМ, особливо за високих температур, значного механічного навантаження та в разі контакту з киснем, металами, керамікою тощо [17, 18].

Існує щонайменше кілька областей застосування конструкційних ГМ, в яких перевага тонкодисперсних ГМ має принциповий характер.

1) Застосування як графітові деталі в установках безперервного лиття кольорових металів. На рис. 1.1 наведено графітові філь'єри і кристалізатори з високодисперсних марок графіту, які набули широкого використання для жароміцних вузлів машин, що використовуються для безперервного лиття металу.

2) Застосування для графітового устаткування під час отримання компонентів електронної техніки, в тому числі монокристалічних напівпровідників (головним чином кремнію), підкладки для отримання елементів інтегральних схем (мікропроцесорів) і світлодіодів, тиглів, нагрівників, сусцепторів для епітаксійних реакторів тощо (рис. 1.2). Процес отримання компонентів електронної техніки відрізняється вкрай високою вартістю оброблюваних матеріалів, що потребує підвищених вимог до компонентів, що використовуються, головним чином до графітового оснащення.

3) Застосування в точному машинобудуванні для електрод-інструментів під час електроерозійної обробки металів (рис. 1.3). Структура кристалічної решітки графіту дає змогу виготовляти електроди з високою якістю поверхні без використання додаткових фінішних видів обробки шляхом простого полірування електрода до дзеркального блиску, що дає змогу в кінцевому результаті отримувати деталь з високою якістю поверхні. Також треба зазначити, що в більшості режимах електроерозійної обробки графітові електроди мають кращу ерозійну стійкість порівняно з іншими матеріалами.



Рис. 1.1. Графітові філь'єри та кристалізатори з високодисперсних марок графіту, що використовуються в механізмах для безперервного лиття металу

4) Застосування як матеріалів для виготовлення складальних прес-форм гарячого пресування під час виробництва керамічних елементів та алмазного інструменту (рис. 1.4). Прес-форма має забезпечувати гаряче пресування під час дії на неї високого тиску (до 200 МПа) і високих температур (до 2000 °С). Також графітова прес-форма має витримувати багаторазові цикли гарячого пресування. Чистота поверхонь прес-форм, особливо поверхонь, що безпосередньо контактують з формою деталі, істотно впливає на довговічність їх роботи. У зв'язку з цим, формувальні поверхні прес-форм піддаються ретельному поліруванню.

5) Застосування як антифрикційних матеріалів, наприклад, для виготовлення підшипників ковзання, ущільнення для насосів тощо (рис. 1.5). Головне значення в цьому разі має:

- невисокий коефіцієнт тертя та експлуатація без застосування додаткового змащення;
- висока стійкість в агресивних середовищах;
- термостійкість навіть за дуже високих температур;
- стійкість до подальшої деформації;
- відсутність схильності до ефекту втоми матеріалу.



Рис. 1.2. Графітова оснастка, що використовується під час виробництва компонентів електронної техніки: *а* – нагрівники; *б* – підкладка, що використовується під час виробництва світлодіодів; *в* – сусцептори для епітаксійних реакторів; *г* – тигель для вирощування монокристалів германію методом Чохральського

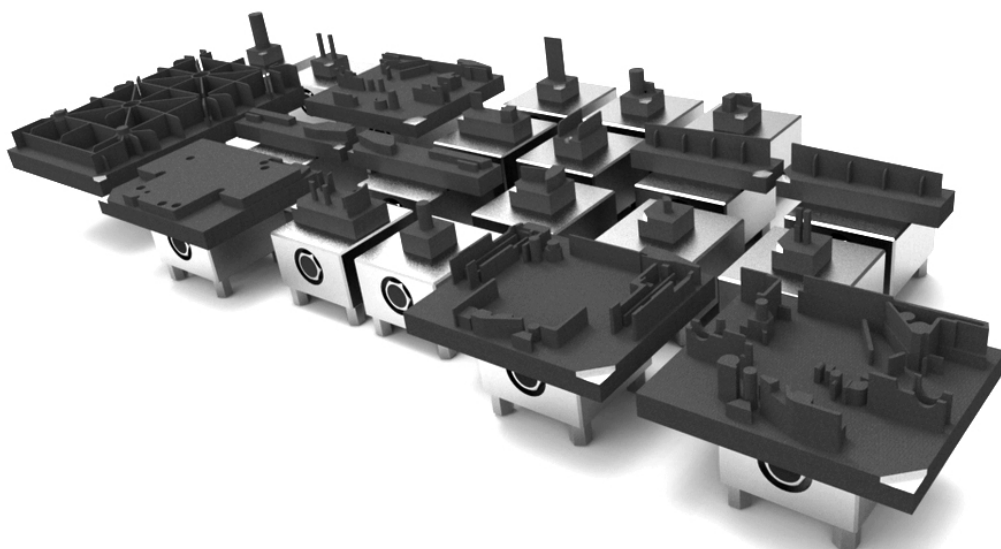


Рис. 1.3. Графітові електрод-інструменти, що використовуються в електроерозійних верстатах



Рис. 1.4. Графітова прес-форма для виготовлення сегментів алмазних відрізних дисків методом гарячого пресування



Рис. 1.5. Графітові кільцеві ущільнення (а) та підшипники ковзання (б)

Таким чином, штучний графіт набув широке застосування в багатьох сучасних наукоємних галузях промисловості, а саме в чорній та кольоровій металургії, атомній енергетиці, хімічній промисловості, точному машинобудуванню, під час виробництва компонентів електронної техніки, скла та кераміки та низки інших матеріалів.

1.2. Сучасний стан виробництва штучного графіту

Основний об'єм світового виробництва високоякісного конструкційного графіту сконцентрований у таких промислово розвинених країнах як Японія, США, Німеччина та Франція [19].

Враховуючи особливості історичного розвитку виробництва ГМ за особливостями технології виробництва та розміри зерен, можливо класифікувати штучний ГМ на п'ять поколінь (класів) [17]. Відомості про середні розміри зерен і способи формування заготовок різних класів ГМ наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Різні марки штучного графітового матеріалу

Марки штучно графітових матеріалів	Середній розмір зерен, мкм	Спосіб формування заготовок
грубодисперсні	500–3000	прошивне пресування
середньодисперсні	150–500	прошивне пресування, пресування в матрицю
дрібнодисперсні	30–150	пресування в матрицю
дрібнодисперсні ізотропні	30–150	ізостатичне пресування
тонкодисперсні	1–30	пресування в матрицю, ізостатичне пресування

З ГМ, що належать до марок першого покоління, здебільшого виготовляють електроди, одержувані прошивним пресуванням, технологія отримання яких існує вже понад сто років [6, 9, 14, 15]. Із ГМ другого покоління, до яких належать середньодисперсні марки штучного ГМ, одержують вироби за допомогою методів прошивного пресування та пресуванням в матрицю [2, 3]. Технологія виготовлення ГМ цього класу існує понад 60 років, її розвиток був зумовлений бурхливим розвитком металургії та ядерної енергетики [2, 3]. До третього покоління штучного ГМ належать дрібнодисперсні марки з розмірами зерен матеріалу 30–150 мкм, з яких отримують вироби методом пресування преспорошків у матрицю [3, 11]. Технологія отримання даного типу ГМ розроблена ще 40–50 років тому і дає змогу отримати вироби з підвищеними фізико-механічними характеристиками та високою експлуатаційною стійкістю [3, 11]. З метою забезпечення зростаючих потреб ряду галузей, наприклад, напівпровідникової промисловості та металургії, близько 25 років тому було розроблено принципово нову технологію формування заготовок – ізостатичне пресування [17]. Використання цього методу пресування дає змогу отримувати ГМ четвертого покоління. За тих самих розмірів зерен матеріалу і майже за таких же фізико-механічних властивостей, що і ГМ третього покоління, ізотропні дрібнодисперсні ГМ відрізняються підвищеною однорідністю фізико-механічних характеристик матеріалу й можливістю отримувати заготовки значних розмірів (до 1500 мм в довжину і до 600 мм у діаметрі) [17].

За останні десятиліття провідні фірми світу значно розширили номенклатуру та підвищили якість штучних високодисперсних ГМ, що дало змогу задовольнити високі вимоги споживачів у різних галузях сучасної науки та техніки. Фірмами-виробниками налагоджений випуск штучного графіту з розмірами зерен ГМ від 1 мкм до 30 мкм, які можна віднести до п'ятого покоління штучного графіту [17, 20].

Тонкодисперсний графіт має в 1,3–2,0 рази кращі фізико-механічні характеристики порівняно зі звичайним конструкційним графітом, що дає змогу виготовляти деталі високого класу шорсткості поверхні за значної

швидкості їх механічної обробки [17, 20]. За стійкістю до термоудару деякі марки тонкодисперсних ГМ також перевершують звичайні дрібнодисперсні ГМ [21, 22].

Властивості сучасних дрібнодисперсних і тонкодисперсних ГМ, що серійно випускаються зарубіжними фірмами, варіюються в широких межах. Відмінною особливістю сучасних високодисперсних ГМ, що випускаються за кордоном, є принципово нове для полікристалічного графіту поєднання високих фізико-механічних властивостей, тонкої пористості, високого ступеня досконалості кристалічної структури та однорідності структури матеріалу [16, 20].

ГМ різних поколінь суттєво відрізняються за вартістю їх виробництва: вартість ГМ 4-го покоління перевищує вартість ГМ 1-го приблизно в 50 разів, а вартість ГМ 5-го покоління – в 100 разів [17]. Незважаючи на високу вартість, за кордоном ГМ 4-го і 5-го покоління майже витіснили звичайні дрібнодисперсні графіти.

Проте натеper широке застосування технологічних процесів отримання тонкодисперсного графіту в Україні відсутнє. Виробництво нового покоління ГМ у перспективі дасть змогу не тільки задовольнити зростаючий попит високотехнологічних виробництв у країні, але й експортувати продукцію у вигляді матеріалів і готових виробів.

1.3. Структурована будова штучного високодисперсного графіту та методи її дослідження

Графіт – це темно-сіра непрозора речовина, алотропна модифікація вуглецю, найбільш стійка за звичайних умов. На відміну від природного штучний графіт має переважно гексагональну будову, кристалічна решітка якого зображена на рис. 1.6, де пунктирними лініями показано елементарну кристалічну комірку, а літерами A, B – вуглецеві шари. Елементарна комірка відноситься до просторової групи $R6_3/mmc (D_{6h}^4)$ і представляє собою призму заввишки 0,6708 нм з ромбом в основі. Решітка складається з паралельних шарів (базисних площин), утворених з атомів вуглецю у формі правильних шестикутників. Атоми кожного шару розташовані навпроти центрів шестикутників, що знаходяться в сусідніх шарах (нижньому й верхньому). Розташування шарів повторяється через один і кожен шар зміщений відносно іншого в горизонтальному напрямку на 0,1418 нм. Кожен атом базисної площини зв'язаний із трьома сусідніми, розташованими від нього на відстані 0,1415 нм. Енергія зв'язку між атомами становить 710 кДж/моль. Взаємодія між базисними площинами здійснюється за рахунок Ван-дер-Ваальсових сил; енергія зв'язку складає 4,2–18,2 кДж/моль, а відстань між ними – 0,3354 нм [3, 23].

Для штучного та природного графіту властиві різні стійкі дефекти їхньої структури. До них належать дефекти укладання шарів, двійники, гвинтові та крайові дислокації, «діркові» дефекти (відсутність групи або одного атома), введення атомів інших елементів. Наявність дефектів призводить до зміни

механічних, теплофізичних, електричних та інших важливих властивостей графітових матеріалів. На деякі властивості графіту можуть впливати присутні в ньому гетероатоми, що розташовані на призматичних гранях кристалічної решітки графіту [3].

Початковий вихідний вуглеграфітовий матеріал, що використовується під час виробництва штучного графіту, утворений з вуглецевих гексагональних шарів із значною кількістю вигинів, вакансій та їх груп, а також великої кількості гетероатомів. Також у ньому присутні окремі плоскі ділянки, що утворені з декількох шарів з майже паралельним розташуванням. Такі групи площин можуть розташовуватися у вигляді лінійно-протяжних або сферичних утворень.

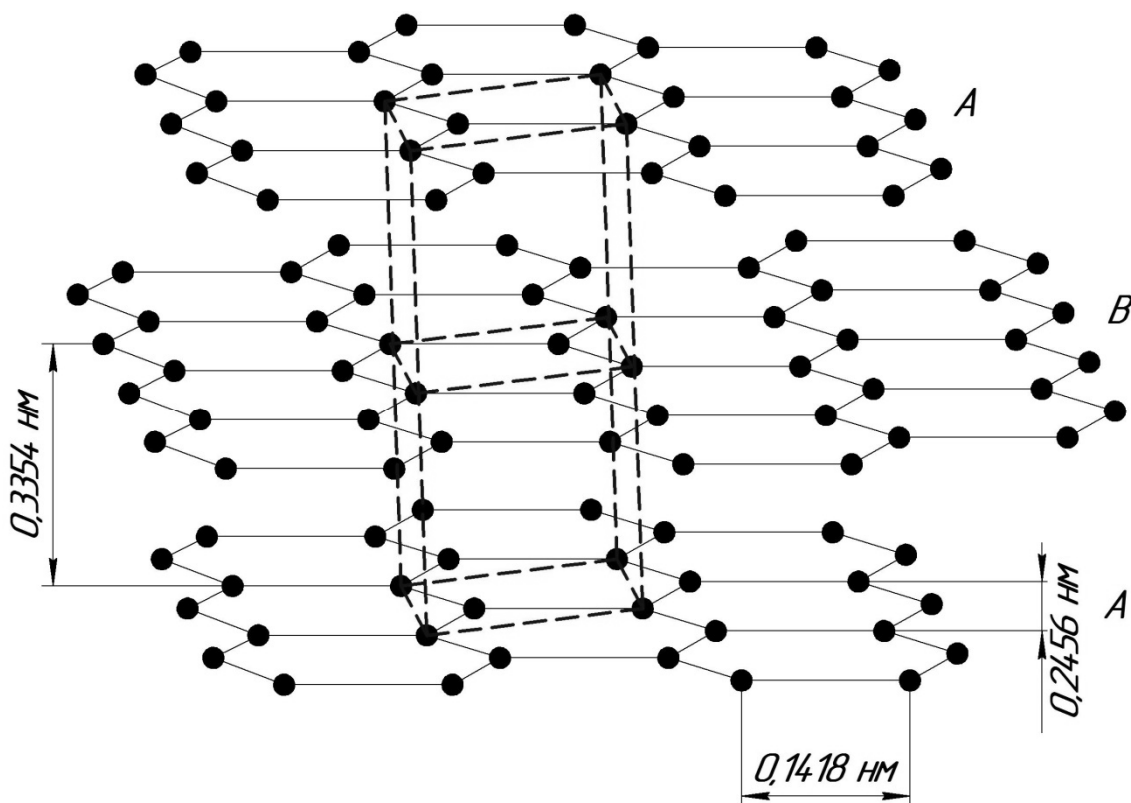


Рис. 1.6. Кристалічна решітка графіту

Структурна анізотропія, тобто взаємне розташування вуглецевих структур у вихідному вуглеграфітовому матеріалі, зумовлює його здатність до тривимірного впорядкування (графітування) під час високотемпературної термообробки. Паралельне розташування та мала разорієнтація вуглецевих шарів один відносно іншого сприяють їх розпрямленню та агрегації у групи і подальшому графітуванню вуглецевого матеріалу під дією високих температур [5, 24].

Графітування вуглецевого матеріалу є складним, багатостадійним процесом тривимірного впорядкування атомів вуглецю у структуру графіту під дією високих температур, як це зображено на рис. 1.7.

Існує декілька методів, що дають змогу кількісно охарактеризувати деякі особливості кристалічної структури вуглецевих матеріалів. Найбільшого

поширення отримали методи рентгеноструктурного аналізу (РСА), основані на вивченні дифракції рентгенівського випромінювання на атомах, розташованих у різних кристалографічних площинах просторової решітки вуглецевих матеріалів [3].

Аналіз дифрактограм дає змогу визначати такі показники ступеня досконалості кристалічної структури як розміри областей когерентного розсіювання, розміри кристалітів: d_{002} – середня відстань між шарами графіту в кристалі, L_a – середній діаметр і L_c – середня висота кристаліта, а також ряд параметрів, що характеризують ступінь спотворення кристалічної решітки [2, 3, 11, 25]. Відстань d_{002} розраховується за положенням центра ваги лінії (002) з рівняння Вульфа–Брегга [11]

$$d_{002} = \frac{n\lambda_p}{2\sin\vartheta}, \quad (1.1)$$

де $n = 1$ – порядок відбиття; λ_p – довжина хвилі рентгенівського випромінювання, м; ϑ – кут відбиття, що визначається положенням зйомки, рад.

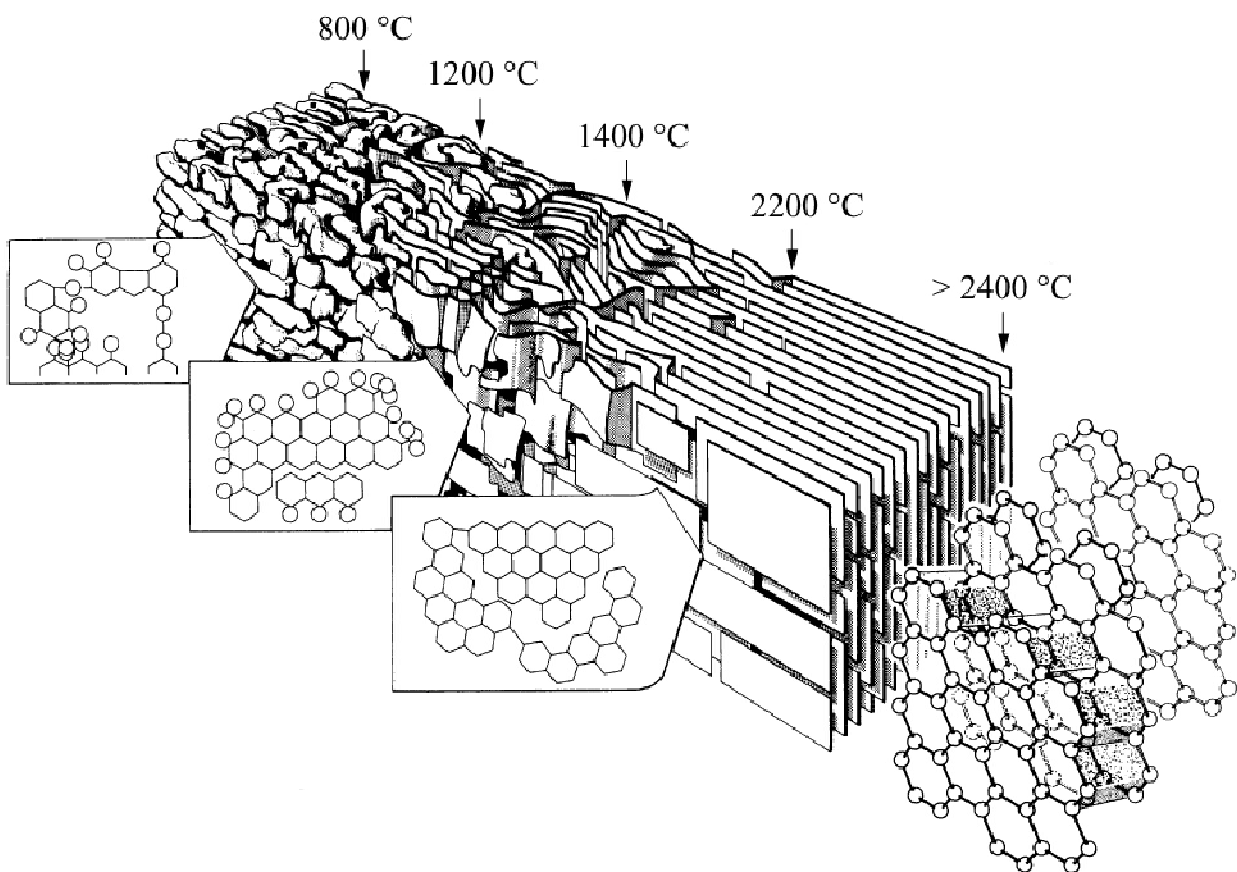


Рис. 1.7. Зміна структури вуглецевого матеріалу у процесі його нагрівання

Розміри кристалітів L розраховуються за половиною ширини дифракційних максимумів за допомогою модифікованої формули Селякова–Шеррера [11]:

$$L = \frac{A\lambda_p}{\beta \cos \vartheta}, \quad (1.2)$$

де $A = 0,89$ – безрозмірний коефіцієнт, що залежить від форми частинок (стала Шеррера); β – ширина половини висоти амплітуди відповідного дифракційного піку, м.

Діаметр (L_a) і висоту кристалітів (L_c) визначають за шириною половини висоти амплітуди дифракційних піків (002) і (110), відповідно [11].

Однак оцінка ступеня досконалості кристалічної структури методом РСА не є вичерпною. До найважливіших досягнень у дослідженнях структури вуглецевих матеріалів, у тому числі і ГМ, варто віднести розвиток електронної мікроскопії високої роздільної здатності, що дає змогу отримувати безпосереднє зображення графітоподібних шарів для матеріалів з температурою обробки понад 1000 °С [26]. За допомогою цього методу вперше показана можливість кількісного визначення розмірів областей переважної орієнтації кристалітів [26]. Цей метод знайшов широке застосування в дослідженнях структури графітованих вуглецевих матеріалів.

Серед інших структурно-чутливих методів важливе місце в дослідженнях структури вуглецевих матеріалів займає комплекс методів, заснованих на вивченні електронних властивостей полікристалічних вуглецевих матеріалів, зокрема, діамагнітної сприйнятливості (ДМС) й електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) [27]. ДМС і парамагнітна сприйнятливість носіїв заряду вуглецевих матеріалів визначаються положенням рівня Фермі та можуть характеризувати ступінь дефектності вуглецевих шарів [27].

Подальші дослідження надкристалітної структури вуглецевих матеріалів методами, заснованими на вивченні їх електронних властивостей, дали змогу розробити метод оцінки мікротекстури вуглецевих матеріалів за анізотропією ДМС [28, 29]. Кількісним показником мікротекстурування матеріалу є величина $\sin^2 \theta$, яка визначається за методикою, описаною в працях [28, 29]. Метод заснований на вимірюванні анізотропії ДМС орієнтованих у магнітному полі порошкоподібних зразків досліджуваного матеріалу

$$\sin^2 \theta = \frac{2}{3} \frac{\chi_{\perp} - \chi_{\parallel}}{\chi_{\perp} + \Delta\chi - \chi_{\parallel}}, \quad (1.3)$$

де θ – кут між нормальми до вуглецевих шарів і напрямком бажаної орієнтації, рад; χ_{\perp} – ДМС в напрямку, перпендикулярному осі текстури, м³/кг; $\Delta\chi = \chi'_{\perp} - \chi_{\parallel}$ – анізотропія ДМС, м³/кг; χ_{\parallel} – ДМС у напрямку, паралельному площині шару, м³/кг; χ'_{\perp} – ДМС у напрямку, перпендикулярному площині шару, м³/кг.

Для ГМ величина $\sin^2 \theta$ становить у межах 0,5–0,63 [28, 29]. У разі ідеальної орієнтації графітоподібних шарів у мікрооб'єктах порядку 1 мкм, наприклад, для піролітичного графіту, значення $\sin^2 \theta$ наближаються до одиниці,

а для повністю ізотропного матеріалу, наприклад, для скловуглецю, значення $\sin^2\theta$ становить 0,66 [28, 29].

Напівкількісним методом, що характеризує мікротекстуру полікристалічних вуглецевих матеріалів в об'ємах за розмірами, близьких до сотень нанометрів, є ширина лінії сигналу ЕПР [27]. Враховуючи, що сигнал ЕПР полікристалічних вуглецевих матеріалів, виміряний за температур близько 300 К, зумовлений делокалізованими парамагнітними центрами – носіями заряду, ширина лінії сигналу ЕПР ΔH визначається анізотропією та ефектами трансляційного усереднення g -фактора [27, 30]

$$\Delta H \approx \Delta g \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 \theta \right), \quad (1.4)$$

де $\Delta g = g_3 - g_1$ – анізотропія g -фактора; g_1 – значення g -фактора в напрямку, паралельному шару; g_3 – значення g -фактора в напрямку, перпендикулярному шару.

Відповідно до сучасних уявлень, основу структури ГМ складають графітоподібні шари, упаковані в кристаліти [3, 11]. Вуглецеві шари містять дефекти у вигляді «вибитих» атомів, вакансій, дислокацій тощо. Значення d_{002} для ГМ зазвичай перевищують значення, знайдені для монокристала та становлять у межах 0,336–0,339 нм. Розміри кристалітів можуть бути різними, однак зазвичай значення L_a і L_c становить 20–100 нм, причому значення L_a перевищує значення L_c [3, 11].

Кристаліти з'єднані між собою та мають взаємну орієнтацію. У працях [31–34] виконано дослідження методом електронної мікроскопії високої роздільної здатності, де показано, що ступінь взаємної орієнтації кристалітів для різних вуглецевих матеріалів може бути різною. Найбільш адекватна сучасним уявленням модель взаємного розташування кристалітів у ГМ та інших вуглецевих матеріалах запропонована у праці [35] і наведена на рис. 1.8.

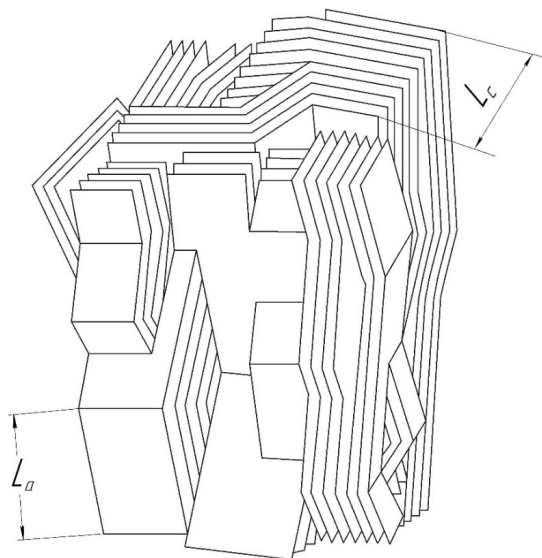


Рис. 1.8. Надкристалічна структура полікристалічного вуглецевого матеріалу [35]

Макротекстура, тобто переважна орієнтація кристалітів, може створюватися під час формування та існувати в усьому об'ємі заготовки [2, 3, 5, 11, 29, 36]. На рис. 1.9 наведені різні типи макротекстури графітових заготовок, отриманих різними методами формування [3, 36].

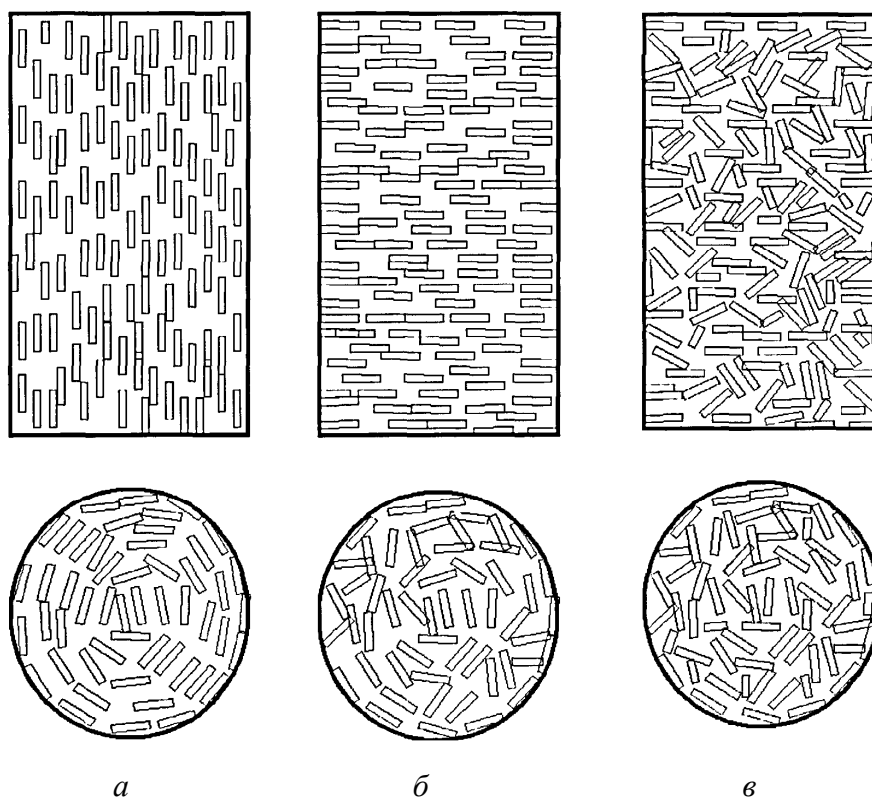


Рис. 1.9. Макротекстура циліндричних заготовок штучного графіту, виготовлених різними способами: *а* – прошивне пресування (видавлювання); *б* – пресування в матрицю; *в* – ізостатичне пресування

Макротекстура ГМ зазвичай визначається методом РСА, а також може бути оцінена за величиною анізотропії фізико-механічних властивостей, таких як модуль пружності, електричний опір, коефіцієнт теплопровідності тощо [2, 3, 5]. Під час використання методу РСА макротекстура визначається за інтенсивністю дифракційних піків, а також за їх формою [3, 11]. Макротекстура ГМ найкраще проявляється під час прошивного пресування заготовок і пресуванні в матрицю [3, 11]. У разі ізостатичного пресування макротекстура відсутня [3, 36].

Широкого поширення одержали методи, засновані на комп'ютерній обробці зображень поверхні вуглецевих матеріалів. Методи оптичної мікроскопії застосовуються для визначення розмірів зерен наповнювача і параметрів пористої структури матеріалу [16, 37, 38]. На рис. 1.10 наведено мікрофотографії розміром 600×600 мкм перерізів матеріалів, виготовлених із різних класів ГМ [39].

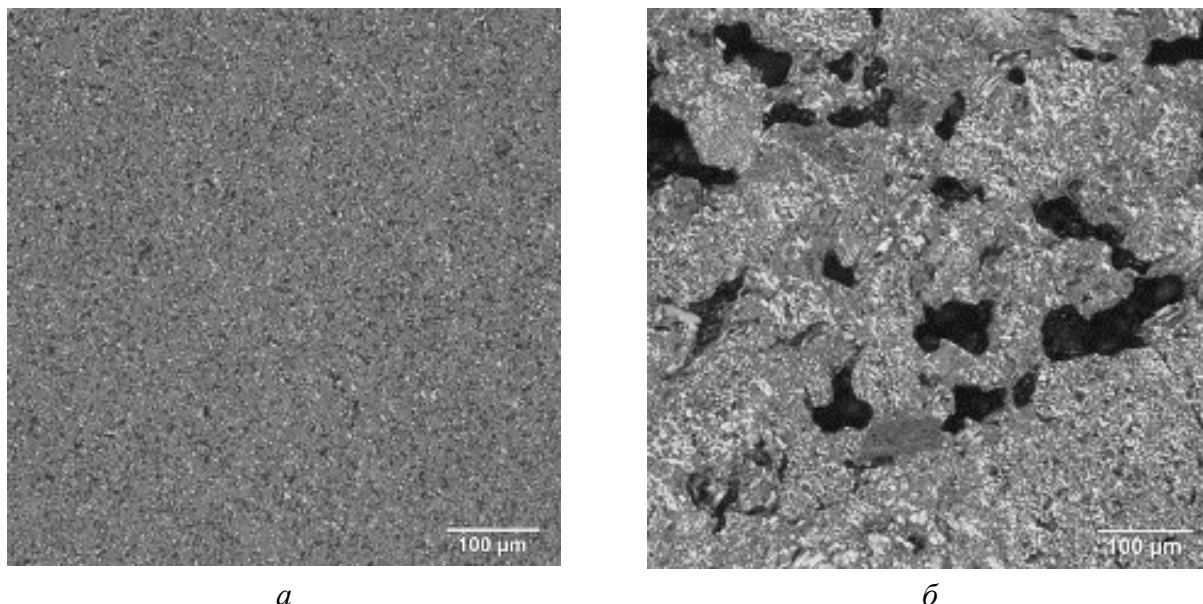


Рис. 1.10. Мікрофотографії перерізів матеріалів, виготовлених з ізотропного графіту високої густини (а) та звичайного ізотропного графіту [39]

До числа важливих методів дослідження структури графіту, належать також методи, що характеризують розподіл пор за розмірами. Для ГМ це насамперед метод ртутної порометрії [2, 3, 6, 11, 16]. Пориста структура ГМ визначається особливостями технології виготовлення матеріалу [16].

Пори, що пов'язані з поверхнею, утворюють «відкриту» поруватість. Ізольовані пори, тобто ті, що не сполучені з поверхнею або сполучені через проходи менших розмірів, ніж молекули рідини або газу, за допомогою яких визначається відкрита поруватість, складають «закриту» поруватість [3, 11].

У науково-технічній літературі, пов'язаній з ГМ, найчастіше наводиться повна пористість матеріалу, розрахована за формулою [3, 11]:

$$\varepsilon = \frac{d_p - d}{d_p}, \quad (1.5)$$

де $d_p = 2260 \text{ кг/м}^3$ – рентгенівська густина графіту; d – густина досліджуваного графітового матеріалу, кг/м^3 .

Більшість існуючих ГМ отримують, використовуючи «вуглекерамічну» технологію [6, 9, 15, 17]. У цьому випадку структура матеріалу формується в результаті взаємодії щонайменше двох компонентів: твердого вуглецевого наповнювача та вуглевмісного в'язучого матеріалу. Тому ГМ не є гомогенними на мікрорівні, як це показано в більшості робіт, виконаних методами оптичної та електронної мікроскопії [38, 40, 41]. Показано, що вуглецева структура в'язучого матеріалу, що перебувають у прилеглих до поверхні наповнювача шарах, певною мірою успадковує структуру поверхні наповнювача та відрізняється від структури у віддаленому від поверхні наповнювача об'ємі [41].

1.4. Особливості сучасної технологічної схеми отримання ізостатичного графіту

Сучасна схема отримання ізостатичного штучного графіту наведена на рис. 1.11 і включає [42–50]:

- подрібнення, розмелювання та класифікація на фракції вуглецевого наповнювача;
- змішування його із в'язучою речовиною й отримання коксопекової композиції;
- подрібнення коксопекової композиції з метою отримання преспорошку;
- формування заготовок шляхом ізостатичного пресування;
- випалювання у відновлювальному або нейтральному середовищі за температури до 800–1300 °С;
- графітування за температури до 2500–3000 °С.

Процес виробництва ізостатичного графіту (ІГ) починається з приготування вихідної сировини, а саме подрібнення наповнювача – коксу різної природи та підготовки «матриці – в'язучого матеріалу» – зазвичай кам'яновугільного пеку [44].

Як наповнювач використовують сланцевий [45, 46], нафтовий [47] і пековий кокс [48, 49, 50], а також суміш коксового дріб'язку різної природи [49]. Голчастий кокс майже не використовують через досить високу анізотропію частинок, утворених після процесу подрібнення, однак такий кокс дає змогу отримувати матеріал високої густини з низьким коефіцієнтом термічного розширення (КТР) [48].

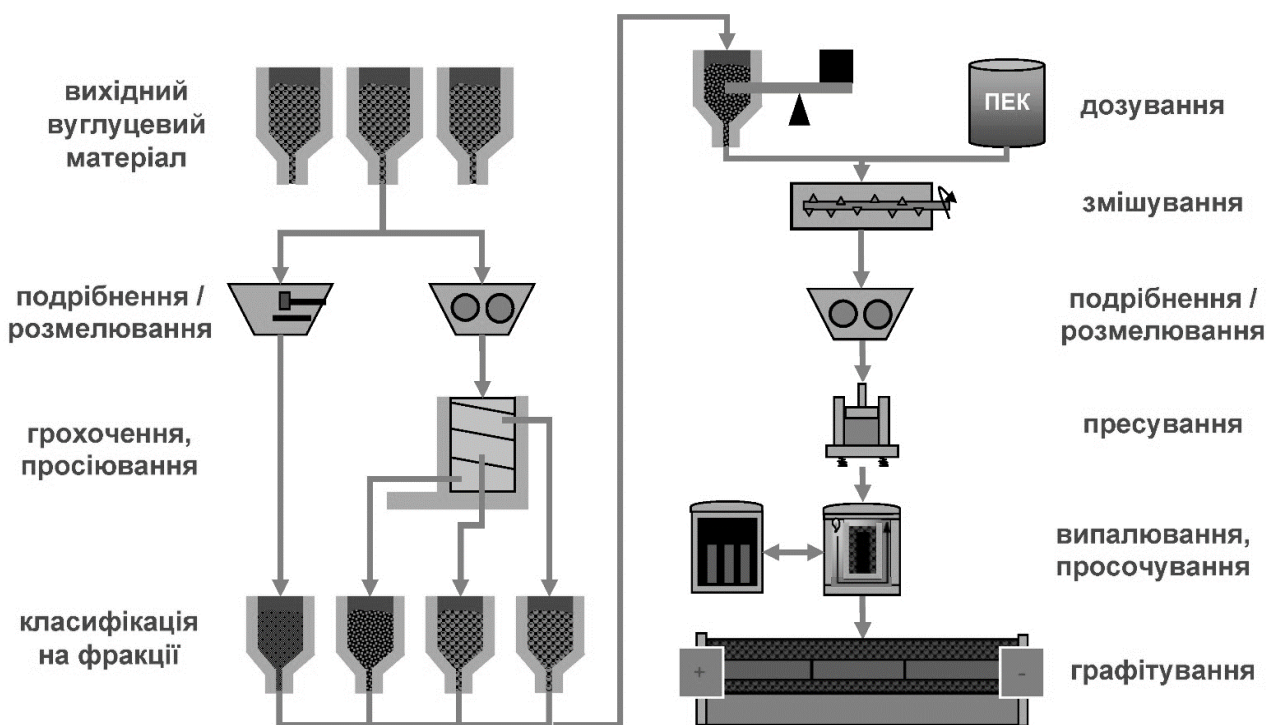


Рис. 1.11. Технологічна схема отримання виробів на основі ізостатичного графіту

Також існує технологія отримання однокомпонентного ізостатичного графіту на основі мезофазних пеків, які одержують у результаті спеціальної термічної обробки кам'яновугільних пеків. Порошок з такого матеріалу є самов'язучим і не потребує додавання до нього в'язучого матеріалу під час виробництва конструкційного графіту. У результаті отримані з порошків на основі мезофазних пеків вироби мають підвищену ізотропність і фізико-механічні характеристики [51].

Після подрібнення наповнювача його розмелюють з метою отримання фракції з середнім розміром зерен (30–150) мкм для дрібнодисперсних марок графіту або до (1–30) мкм для тонкодисперсних марок. У результаті аналізу продукції на основі ізостатичного графіту таких компаній як:

- SGL Carbon (Німеччина);
- Mersen (Франція);
- Toyo Tanso (Японія);
- GrafTech (США);
- АТ «НИИГрафит» (Росія),

встановлено, що наразі найбільш затребувані на міжнародному ринку з виробництва вуглецевої продукції тонкодисперсні ізостатичні графіти з середнім розміром зерен 10–20 мкм. Важливо також зазначити, що надтонке подрібнення вуглецевих наповнювачів до розмірів частинок близько 1 мкм досягається за рахунок механічної енергії на рівні 15 кДж/г. Зі зменшенням розміру частинок від 30 мкм до 1 мкм енерговитрати на подрібнення збільшуються більш ніж на три порядки [48]. Також це призводить до зниження ступеня досконалості кристалічної структури вуглецевих наповнювачів. Руйнування матеріалу до розмірів частинок менше 1 мкм призводить до зниження його здатності графітуватися [52]. Даний факт показує принципову неможливість застосовувати такого матеріалу як наповнювач для виробництва штучного графіту, принаймні за потреби отримати матеріал з високою тепло- та електропровідністю.

Також важливо підбирати такий гранулометричний склад наповнювача, щоб за один технологічний цикл мати змогу отримувати готові графітові заготовки з уявною густиною понад 1700 кг/м³. Така оптимізація в ряді випадків дає змогу підвищити уявну густину одержуваних графітів на 150 кг/м³ та отримувати готові вироби з дрібнозернистого графіту без проведення додаткових технологічних циклів «просочення – випалювання» [48].

Встановлено, що густина упакування частинок наповнювача визначається співвідношенням розмірів найбільших і найменших за розмірами частинок – чим більша ця різниця, тим більша густина упаковки досягається. На рис. 1.12 наведено залежність максимальної об'ємної частки наповнювача від співвідношення граничних розмірів частинок $\delta_{\min}/\delta_{\max}$ у полідисперсних наповнювачах. Анізотрія частинок за даних обставин є негативним фактором, який знижує густину упаковки [48]. На рис. 1.13 наведено результати теоретичних розрахунків з визначення оптимального гранулометричного складу наповнювача за $\delta_{\max}=100$ мкм [17].

Для систем, що забезпечують максимальну густину упаковки, кількість в'язучої речовини задається величиною вільного об'єму, тобто величиною $(100-P_n)$, як це видно з рис. 1.12.

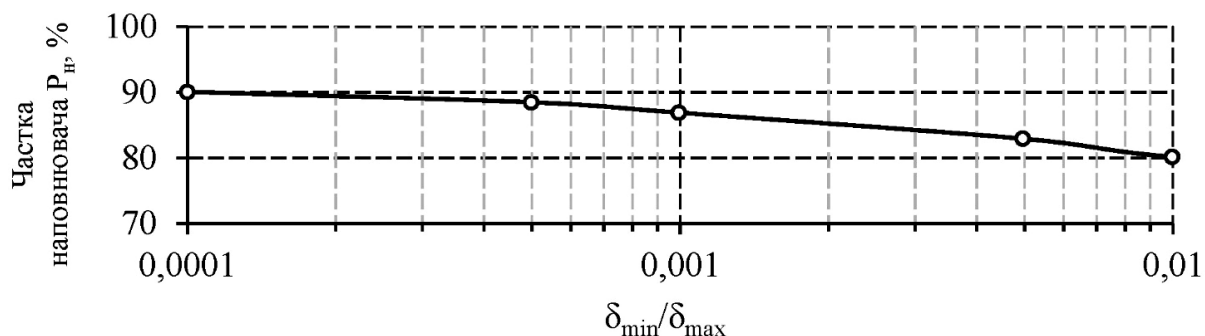


Рис. 1.12. Залежність максимальної об'ємної частки наповнювача від співвідношення граничних розмірів частинок $\delta_{\min}/\delta_{\max}$ у полідисперсних наповнювачах [17]

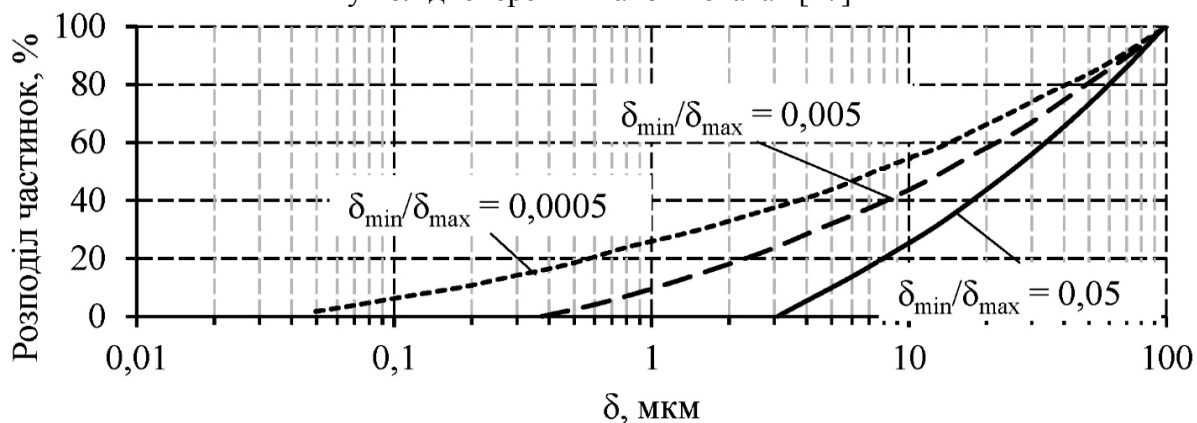


Рис. 1.13. Теоретичне значення функції розподілу частинок по розмірах, які забезпечують максимальну густину упаковки [17]

Підготовку кам'яновугільного пеку здійснюють, наприклад, за допомогою контрольованої термічної обробки до температури 630 °С [49] або додаванням до 1,5 % спеціальних високодисперсних вуглецевмісних добавок з одночасним змішуванням та нагріванням суміші:

- складні феноли та фенілфосфати [45];
- фулерени та фулерити [46];
- нанодисперсний вуглець [46, 50];
- терморозширений природний графіт тощо [50].

Така підготовка дає змогу підвищити фізико-хімічні та технологічні характеристики коксопекової суміші, що є важливим на різних стадіях виробництва штучного графіту. Також це дає змогу створити таку просторову структуру, яка в результаті дає можливість підвищити технологічні властивості кінцевого продукту.

Після підготовки компонентів їх ретельно змішують з одночасним нагріванням до температури значно вищої температури розм'якшення пеку. При цьому коксопекова композиція переважно складається з (60–72) % (по масі) наповнювача та 28–40 % (по масі) в'язучого матеріалу [45, 47, 48, 50].

Далі отриману масу охолоджують до температури навколишнього середовища, подрібнюють, розмелюють і в результаті отримують преспорошок потрібної фракції.

Процес ізостатичного пресування проходить за нормальної температури на ізостатичних пресах за допомогою рідкої речовини, яка з усіх боків рівномірно стискає підготовлений преспорошок за тиску пресування 40–200 МПа [45, 49, 50, 53, 54]. Саме цей процес дає змогу отримувати графітовий матеріал більш високої об'ємної густини, низької пористості та високої твердості.

Далі відпресовані заготовки піддають термічній обробці: випалюванню за температури 800–1300 °С та графітуванню за температури до 3000 °С. Після процесу випалювання заготовки за потреби додатково просочують в'язучим матеріалом і знову повторяють стадію випалювання. У процесі термообробки заготовки зменшуються в об'ємі та ущільнюються [55]. Величина об'ємної усадки залежить основним чином від вибору наповнювача та вмісту в ньому летючих і можуть досягати до 50 % від початкового об'єму відпресованого матеріалу [53–56].

У результаті проведених вище операцій отримують тонкодисперсний ізостатичний графіт, який характеризується такими фізичними властивостями (за с. у.) [42]:

- питомий електричний опір – (10–15) мкОм·м;
- коефіцієнт теплопровідності – (70–140) Вт/(м·К);
- КТР (до 200 °С) – $(3 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-6}) \text{ K}^{-1}$, густина – (1,7–1,9) г/см³.

Міцність ізостатичного графіту залежить від середнього розміру зерен [48]. На рис. 1.14 наведено залежності модуля пружності та характеристик міцності різних типів конструкційного графіту від середнього розміру зерен наповнювача приведених до значень матеріалу з нульовою поруватістю. Для побудови даних залежностей використовувалася доступна у відкритому доступі інформація щодо властивостей сто найпоширеніших марок зарубіжних зразків високодисперсного графіту виробників:

- GrafTech Int. (США) [57];
- SGL Carbon (Німеччина) [58];
- Mersen (Франція) [59];
- Toyo Tanso (Японія) [60];
- Ibiden Co. (Японія) [61].

Зі зменшенням розмірів зерен збільшується КТР тонкодисперсних графітів. Це пов'язано з ростом кристалів, чим продукується термічне розширення графіту [17]. Також збільшується температура початку окиснення на повітрі з 400 °С до 500 °С і з 2000 °С до 2400 °С в інертному середовищі, що обумовлено зниженням середнього розміру пор [17, 18]. Додавання бору як модифікатора дає змогу підвищити температуру початку окиснення на повітрі до 700 °С та зменшити КТР нижче 10^{-6} K^{-1} [62].

Завершальним етапом виготовлення ізостатичного графіту є механічна обробка графітових заготовок. За потреби також здійснюється газотермічна очистка.

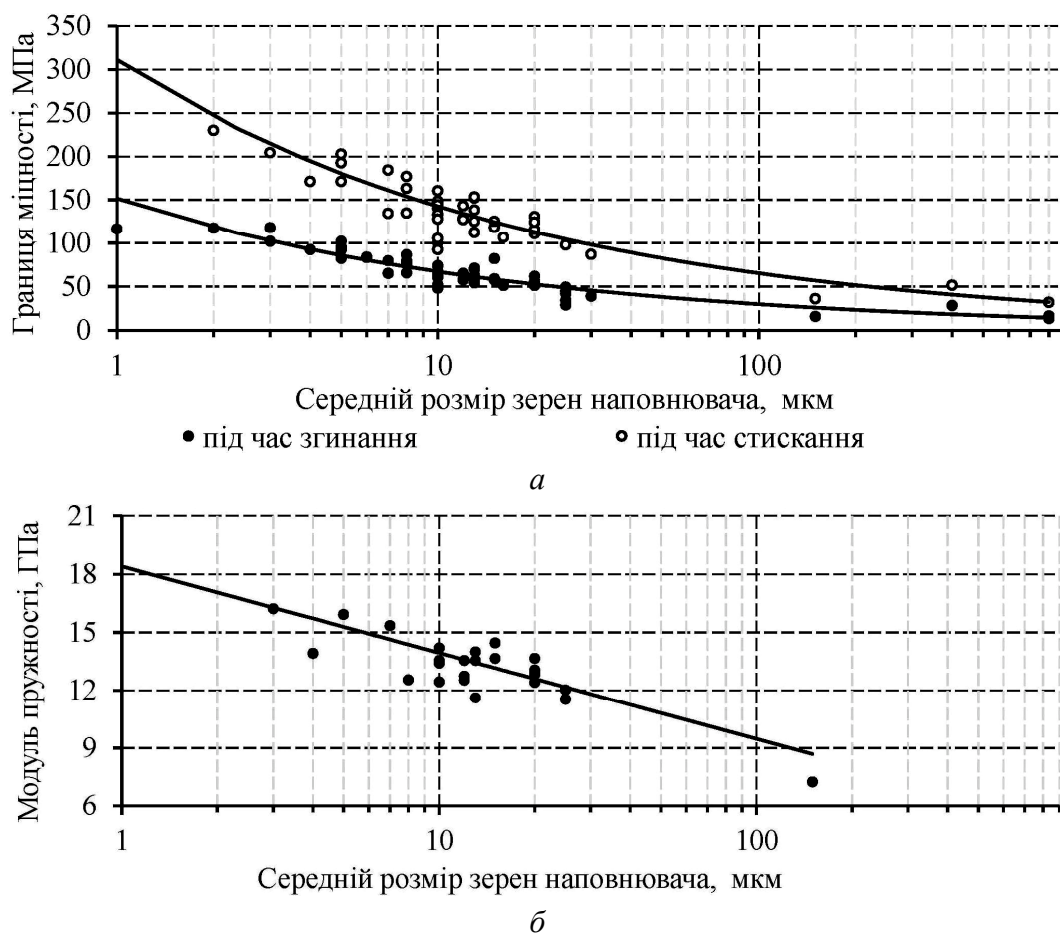


Рис. 1.14. Залежність від середніх розмірів зерен наповнювача: а – границі міцності; б – модуля пружності для різних марок штучного графіту

1.5. Перспективи світового виробництва ізостатичних графітових матеріалів

Лідерами в галузі виробництва конструкційних штучних графітів є [19]:

- GrafTech Int. (США);
- Graphite India (Індія);
- HEG (Індія);
- JSC Energoprom Management (Росія);
- Nippon Carbon Co. (Японія);
- SEC Carbon (Японія);
- SGL Carbon Group (Німеччина);
- Showa Denko Carbon Inc. (США);
- Ibiden Co. (Японія);
- Mersen Group (Франція);
- Poco Graphite Inc. (США);
- Toyo Tanso Co. (Японія);
- Schunk Group (Німеччина).

Розвиток фотоелектричної галузі, збільшення обсягів виробництва напівпровідників, удосконалення технології електроерозійної технології – все це підвищує попит на ізостатичний графіт [63–65]. Також це змушує перераховані вище компанії розширювати асортимент продукції та удосконалювати технологію виробництва. Наразі світове виробництво ізостатичного графіту становить близько 120 кт/рік і продовжує зростати [63].

У результаті аналізу наявної у відкритому доступі інформації встановлено, що в найближчі декілька років очікується збільшення світового виробництва ізостатичного графіту понад 5 % щорічно (рис. 1.15). За цих обставин найбільшого зростання виробництва очікується в Китаї (рис. 1.16), на який припадає більше чверті всього світового виробництва ізостатичного графіту [63].

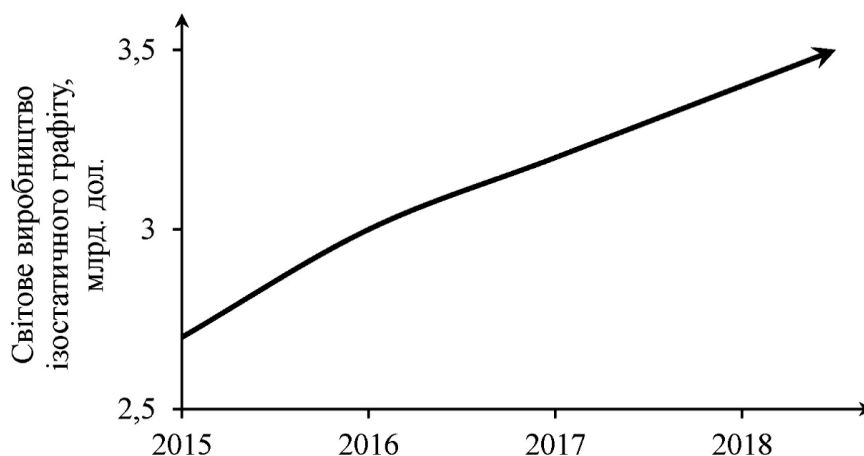


Рис. 1.15. Тенденція світового виробництва ізостатичного графіту [63]

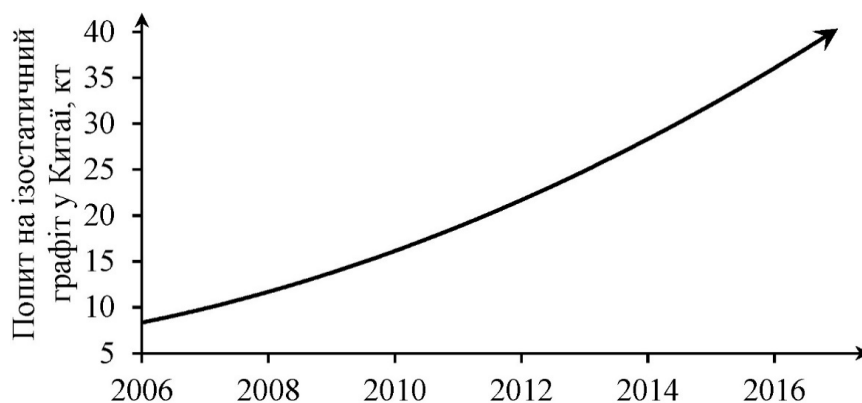


Рис. 1.16. Тенденція виробництва ізостатичного графіту в Китаї [63]

Така тенденція зростання виробництва ГМ сприяє розвитку нової технології виробництва ізостатичного графіту в Україні. У результаті це дасть змогу українським виробникам конкурувати із зарубіжними фірмами з виробництва високодисперсних марок графіту.

Проте відсутність повністю розробленої конкурентоспроможної технології виробництва ізостатичного графіту ставить під загрозу можливий подальший її розвиток в нашій країні. Також промислове впровадження виробництва сонячних фотоелементів на основі графену [66, 67] може призвести загалом до значного зниження темпів світового виробництва ізостатичного графіту.

1.6. Концепція технологічного процесу отримання заготовок ізостатичного графіту

На підставі проведеного аналізу сучасного стану виробництва ІГ можна сформулювати концепцію технології його отримання [68]. До основних положень технологічного процесу отримання заготовок ізостатичного графіту можна віднести такі:

1) використання за наповнювач коксу з температурою прожарювання понад 1300 °С і середнім розміром зерна 30 мкм для забезпечення достатньо високого значення усадки заготовок під час випалювання та графітування та підвищених властивостей міцності кінцевого продукту без застосування додаткових циклів «просочення–випал»;

2) використання зв'язуючого, яке забезпечує достатню жорсткість композиції та не дає змоги силам пружного розширення зменшити величину усадки заготовок. Цим критеріям найбільшою мірою задовольняє високотемпературний пек (ВТП);

3) застосування гарячого змішування коксопекової композиції, під час якого відбувається змочування та покриття частинок наповнювача зв'язуючим;

4) застосування під час приготування преспорошку таких способів помелу коксопекової композиції, які не руйнують структуру композиції, що була досягнута під час змішування;

5) режими ізостатичного пресування або односпрямованого пресування мають забезпечувати отримання заготовок з густиною 1400 кг/м³, що відповідає густині заготовок, які отримуються після випалювання не менше (1550–1650) кг/м³;

6) достатньо тривалі режими випалювання (не менш 600 год) з можливістю регулювання швидкості нагрівання від 1 К/год до 100 К/год, за температурних градієнтів в печі не більше (10–20) К/м;

7) «м'які» режими графітування, які перевищують за тривалістю існуючі режими для звичайних заготовок, з плавним введенням потужності у піч, що забезпечує зменшення термічних градієнтів в печі графітування.

1.7. Висновки до розділу 1

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1) Штучний графіт набув широкого застосування у промисловості завдяки унікальному поєднанню фізико-механічних характеристик, а саме:

- високій температурі сублімації (понад 3000 °С);
- збільшенню міцності графіту під час нагрівання;
- високій стійкості до термічного удару тощо.

2) Встановлено, що штучні графітові матеріали за особливостями технології виробництва та розміри зерен поділяють на п'ять поколінь (класів): грубодисперсні, середньодисперсні, дрібнодисперсні, дрібнодисперсні ізотропні, тонкодисперсні. Визначено, що порівняно з іншими марками графіту

тонкодисперсні графіти мають кращі фізико-механічні характеристики за мінімальної поруватості та особливо високу експлуатаційну стійкість виробів.

3) Встановлено, що схема отримання ізостатичного штучного графіту включає:

- подрібнення та розмелювання наповнювача;
- змішування його із в'язучою речовиною й отримання коксопекової композиції;
- подрібнення коксопекової композиції для отримання преспорошку;
- формування заготовок шляхом ізостатичного пресування;
- випалювання у відновлювальному або нейтральному середовищі за температури від 800 °С до 1300 °С;
- графітування за температури від 2500 °С до 3000 °С.

4) Визначено особливості технології виробництва ізостатичного графіту, що сприяють енергозбереженню та дають змогу удосконалювати фізико-механічні характеристики вихідного матеріалу. Цими особливостями є:

- вибір компонентів та їх склад для отримання коксопекової суміші;
- додавання спеціальних модифікаторів;
- оптимізація гранулометричного складу наповнювача;
- встановлення величини тиску для пресування преспорошку;
- вибір режимів термічного оброблення заготовок тощо.

5) Існує стабільне зростання світового попиту на ізостатичний ГМ та виробу на його основі, що становить більш ніж 5 % від щорічного обсягу світового виробництва. При цьому країною-лідером з виробництва ізостатичного ГМ є Китай.

Проведений аналіз літературних джерел показав актуальність створення наукових засад з розробки ефективних процесів та обладнання виробництва ІГ, розробки технологічних регламентів, що забезпечують ресурсо- й енергозбереження та зменшення техногенного впливу на навколишнє середовище.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

1) вибір сировинної бази для виробництва ізостатичного графіту та гранулометричного складу його компонентів, вибір наявних промислових зразків обладнання для приготування преспорошку та пресувального обладнання;

2) формування вимог до напівфабрикату «зелених» зразків ІГ, одержуваних на етапі пресування та переліку експериментальних досліджень фізичних характеристик пресованих зразків для визначення їх раціональних габаритних розмірів;

3) розробка регламенту пресування дослідних зразків на різних сумішах, визначення їх фізичних властивостей та уточнення регламенту пресування; вибір раціональної пресованої суміші та енергоефективного регламенту її пресування; визначення впливу габаритних розмірів заготовок на раціональний склад та структуру прес-маси та регламент їх пресування;

4) вибір пічного обладнання для випалювання ІГ, розробка фізичної, математичної та числової моделей процесу випалювання «зелених» заготовок

ІГ, проведення числових експериментів, формування вимог до напівфабрикатів, одержуваних на етапі випалювання заготовок, на підставі результатів числових досліджень;

5) дослідження впливу регламенту випалювання на якість, теплофізичні, електричні та механічні властивості, одержуваних зразків матеріалу, вибір раціонального енергоефективного регламенту випалювання на підставі проведених досліджень, визначення впливу габаритних розмірів заготовок на регламент їх випалювання;

6) вибір пічного обладнання для графітування ІГ, розробка фізичної, математичної та числової моделей процесу графітування заготовок для отримання ізостатичного графіту, проведення числових експериментів, формування вимог до заготовок ізостатичного графіту на етапі їх графітування на підставі результатів числових досліджень, розробка схеми експериментальних досліджень процесу графітування заготовок ІГ;

7) дослідження впливу регламенту графітування на якість, теплофізичні, електричні та механічні властивості заготовок ізостатичного графіту, вибір раціонального енергоефективного обладнання та регламенту графітування; визначення впливу габаритних розмірів заготовки на регламент їх графітування;

8) підготовка до апробації розроблених технологічних регламентів та устаткування для виробництва ІГ у промислових умовах.

2. ПЕРЕДІЛ ПРЕСУВАННЯ ЗАГОТОВОК ІЗОСТАТИЧНОГО ГРАФІТУ

2.1. Сировинна база для отримання заготовок ізостатичного графіту. Раціональний склад коксопекової композиції

Проведення відбору сировинної бази для отримання ІГ здійснено відповідно до основних положень технологічного процесу отримання заготовок ізостатичного графіту (п. 1.6).

Відомо, що за наповнювач для виробництва штучного графіту застосовується кокс різної структури [7, 8, 15]. Наприклад, голчастий кокс має високу здатність до графітування і його застосовують у виробництві штучного графіту з низьким значенням КТР і високим коефіцієнтом теплопровідності, зокрема, для виготовлення електродів високої якості [69]. Кокс з ізотропною структурою забезпечує отримання конструкційного графіту з підвищеним рівнем міцності й високою раціональною стабільністю [3]. Мезофазні пеки та виділені з них мікросфери є перспективними наповнювачами однокомпонентних тонкозернистих вуглеграфітових матеріалів з підвищеною однорідністю і максимальними для штучного графіту фізико-механічними характеристиками [51, 70].

Перспективним наповнювачем для одержання високоякісного ІГ також є пековий кокс, що отримується на базі високотемпературного кам'яновугільного пеку з температурою розм'якшення 140 °С. Пековий кокс як матеріал з близькими до ізотропного матеріалу властивостями може бути альтернативною сировиною для виробництва дрібнозернистого ІГ [71].

Особливо ефективними як наповнювачі є мезофазні пеки. З ізотропного кам'яновугільного пеку методом термічної обробки в атмосфері інертного газу одержують мезофазні порошки з високим вмістом вуглецю (93–93,5 %) і летких (7 %) з контрольованим розміром частинок від 10 мкм до 15 мкм. Такі порошки є самоспівливими і потребують додавання зв'язуючого під час виготовлення заготовок ІГ [51, 70]. Частинки мезофазного порошку анізотропні, але завдяки своїй сферичній формі під час ізостатичного формування розташовуються випадково, що утворює ізотропну структуру заготовок ІГ на етапі пресування. Такий порошок забезпечує одержання ІГ з високою густиною та підвищеними характеристиками міцності.

Сланцевий кокс виготовляється на основі залишку сланцевої смоли, одержаної в результаті атмосферної дистиляції в процесах термічної термоокиснювальної поліконденсації. Такий кокс за основними показниками якості (істинна густина, усадка під час пресування) відрізняється в кращий бік від рядового смоляного коксу, який застосовується в електродній промисловості. Сланцевий кокс відноситься до ізотропних матеріалів.

Для приготування коксопекових композицій у технології виробництва ІГ наповнювачем може бути високотемпературний пек ВТП завдяки його властивостям утворення жорстких структур під час випалювання. Косопекові композиції, що отримані на основі пеку ВТП, який порівняно з

середньотемпературним пеком (СТП) є менш пластичним, тиск пресування заготовок підвищується. Тобто, густина пресованих заготовок продовжує зростати до тиску пресування 200 МПа. При цьому густина заготовок після випалювання і графітування теж збільшується зі зростанням тиску пресування. Це пояснюється тим, що зв'язуюче утворює матрицю, яка має достатню жорсткість. Таку властивість має пек ВТП, оскільки до його складу входить значна кількість так званої дисперсної фази у вигляді первинної α -фракції (до (25–30) %) у поєднанні з ароматичними речовинами [72]. Тонкодисперсна фаза на початковому етапі в процесі випалювання діє на пекову матрицю як зміцнюючий наповнювач, який і забезпечує достатньо високу жорсткість коксопекової композиції [73].

Грунтуючись на проведеному аналізі для отримання високоякісних заготовок ІГ, що мають фізико-механічні властивості на рівні кращих світових зразків, сировинна база для одержання коксопекової композиції має включати такі компоненти: наповнювач – нафтовий кокс голчастої структури або сланцевий кокс; зв'язуюче – високотемпературний пек. Рекомендована сировинна база для виготовлення ІГ широко використовується в електродній галузі для виготовлення електродів грубодисперсного графіту.

Для одержання пресованих заготовок з густиною 1450 кг/м³ коксопекова композиція для виготовлення ІГ має складатися з наповнювача – попередньо прожарений за температури 1300 °С нафтовий кокс голчастої структури з середнім розміром частинок 30 мкм і зв'язуюче – пек ВТП у кількості (30–40) % (за мас.). За такого матеріального складу композиції роль оптимізації гранулометричного складу для досягнення високої густини заготовок ІГ дещо зменшується через неможливість її досягнення на стадії пресування заготовок. Відповідно при цьому зростає роль досягнення високого значення густини заготовок ІГ під час високотемпературного оброблення, головним чином на переділі випалювання.

2.2. Вибір обладнання для тонкого подрібнення і класифікації наповнювача для отримання ізостатичного графіту. Регламент подрібнення наповнювача

Наразі у світовій практиці продовжується пошук способів удосконалення процесів тонкого подрібнення й сепарації різноманітних матеріалів, включаючи й коксові наповнювачі, що спричинено такими чинниками [74]:

1) зростання потреб у тонкодисперсних матеріалах високої чистоти, тобто з мінімальним забрудненням (намелом) у процесі подрібнення, із заданим гранулометричним складом;

2) громіздкість і низький ККД більшості сучасних подрібнювачів та сепараторів;

3) великі питомі енерговитрати і підвищений знос обладнання.

Загальними проблемами процесу подрібнення є великі питомі енерговитрати на процес подрібнення.

Для оцінки енерговитрат на процес подрібнення використовується параметр енергонавантаження вібромлина [74]

$$I = 2\pi^2 m \nu^2 A^2, \quad (2.1)$$

де m – маса подрібнювальних тіл, кг; ν – частота, с^{-1} ; A – амплітуда, м.

Для оцінки енерговитрат на процес помелу в подрібнювачах ударної дії (струменевий або роторний млин) використовується співвідношення вигляду [74]

$$I = \frac{q\omega^2}{2g}, \quad (2.2)$$

де q – продуктивність млина, кг/с ; ω – швидкість зіткнення частинок у момент удару, м/с .

Для струменевого млина швидкість зіткнення складає 200–400 м/с .

Для роторного млина швидкість зіткнення частинок розраховується за формулою

$$\omega = \frac{\pi D n}{60}, \quad (2.3)$$

де D – діаметр ротора, м; n – частота обертання, хв^{-1} .

Швидкість зіткнення частинок з обертовим складає 20 м/с .

Енергонавантаження вібромлинів можна регулювати, змінюючи співвідношення між масою подрібнювальних тіл, амплітуду і частоту коливань. Енергонавантаження струменевих млинів регулюють, змінюючи тиск і швидкість газового потоку. Енергонавантаження роторних подрібнювачів регулюється в разі зміни швидкості обертання ротора.

За даними [68] видно, що зі зменшення розміру частинок від 30 $\mu\text{м}$ до 1 $\mu\text{м}$ енерговитрати на подрібнення збільшуються більш ніж на три порядки і перевищують 10 кДж/г . Енерговитрати на помел коксу перевищують енерговитрати на подрібнення графіту в п'ять разів. Все це вказує на те, що головним параметром, який необхідно враховувати під час вибору подрібнювачів для тонкого помелу, є питомі енерговитрати.

Для отримання наповнювача з середнім розміром частинок 30 $\mu\text{м}$ можна використовувати вібромлини. Однак, одним із суттєвих недоліків цього обладнання є високий «намел», який за тонкого подрібнення може сягати декількох відсотків від маси подрібненого матеріалу. Цей недолік відсутній у струменевих млинах, які застосовуються для одержання наповнювача з середнім розміром зерна 10 $\mu\text{м}$.

Крім того, струменевий помел наповнювача перешкоджає злипанню частинок [75, 76], що є надзвичайно важливим, враховуючи високу схильність тонкодисперсних порошків вуглецевого наповнювача до агломерації. Струменеві млини наразі мають продуктивність у межах 20–100 кг/год .

До інших подрібнювачів ударної дії треба віднести дезінтегратори й роторні подрібнювачі. Дезінтегратори відрізняються від роторних подрібнювачів наявністю двох концентричних роторів, які обертаються в протилежному напрямку, що дає змогу вдвічі збільшити швидкість зіткнення частинок з робочими тілами. Робочими тілами дезінтеграторів є сталеві пальці, а в роторних – «лопатки». Під час подрібнення наповнювача в газовому середовищі в роторних подрібнювачах або дезінтеграторах, частинка разом з пилогазовим потоком спочатку рухається з певною швидкістю відносно робочого тіла. Частинка перетинає деякий демпфірувальний шар газу, який має місце перед робочим тілом і перебуває в стані спокою відносно останнього, перед тим як зіштовхується з робочим тілом.

Результати розрахунків режимів роторного й струменевого подрібнювачів [77], що виконано для в'язкості повітря $2 \cdot 10^5$ Па·с, густини 1200 кг/м^3 і густини подрібнюваних частинок 2000 кг/м^3 , показують, що для колової швидкості лопатки роторного подрібнювача шириною 10 мм – 150 м/с , частинки розміром $(10\text{--}15) \text{ мкм}$ будуть втрачати половину від початкової кінетичної енергії. Частинки розмірами $(8\text{--}10) \text{ мкм}$ зіштовхнуться з ударними елементами з втратою половини швидкості і не зруйнуються, а частинки розміром $(4\text{--}6) \text{ мкм}$ взагалі лишаються в демпфірувальному шарі та огинають ударні елементи разом з повітрям, не зазнаючи зіткнень. Тобто існує проблема надтонкого помелу зв'язуючого.

Проблема газодинамічного гальмування також існує і в струменевих млинах, в яких розмір загальмованого демпфірувального шару приблизно дорівнює діаметру пилогазового струменя. Шлях гальмування пропорційний густині частинки, що робить вуглецеві частинки важким об'єктом для тонкого подрібнення [77]. Тому спроба підвищити продуктивність струменевих млинів за рахунок підвищення діаметра розгінних патрубків призводить до стрімкого зниження ступеня подрібнення [77]. Однак, якщо радіус струменя більше за шлях зупинки частинки, то подрібнення може відбуватися за рахунок турбулентності потоку, яка виникає в місці зіткнення струменів, але енерговитрати при цьому також суттєво збільшуються і струменеві млини втрачають свої переваги над роторними. Ці недоліки позбавлене обладнання закордонного виробництва за допомогою створення струменевих млинів, що працюють під розрідженням за дуже високої швидкості газового потоку.

Тому в технології виготовлення ІГ доцільно застосовувати вібромлин і струменевий млин закордонного виробництва. Спочатку прожарений нафтовий кокс, що використовується як наповнювач ІГ, попередньо подрібнюється в молотковій дробарці до граничної крупності частинок менших за $1\text{--}3 \text{ мм}$. Подальше подрібнення відбувається на вібромлині до максимальної фракції не більше $90\text{--}170 \text{ мкм}$ (середній розмір $\delta_c = 25\text{--}30 \text{ мкм}$) і далі у струменевому млині до максимальної фракції $40\text{--}60 \text{ мкм}$ ($\delta_c = 10 \text{ мкм}$).

Для класифікації подрібненого наповнювача з метою відбору потрібних фракцій слід використовувати ситовий розсів або сепарацію під дією гравітаційних сил.

Підібраний віромлин для подрібнення наповнювача ІГ виробництва компанії AUBEMA наведено на рис. 2.1, а струменевий млин виробництва фірми NETZSCH – на рис. 2.2.

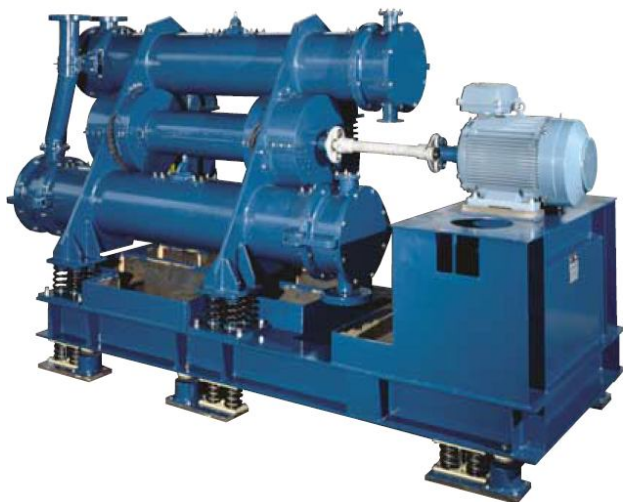


Рис. 2.1. Віромлин AUBEMA, тип 4210: продуктивність – 12 м³/год; $\delta_c=25$ мкм; потужність – 132 кВт

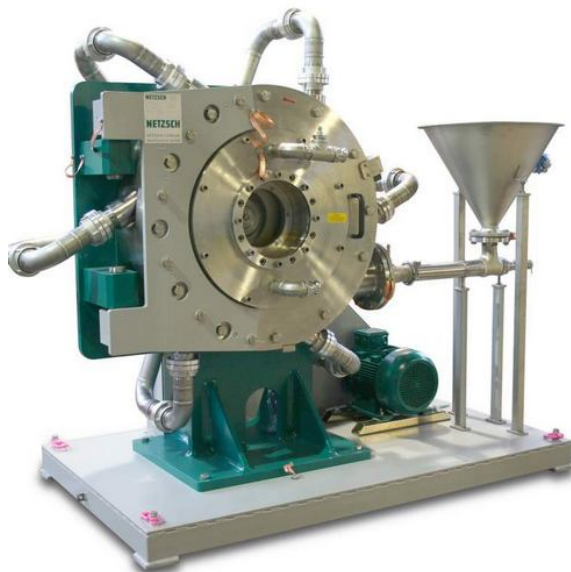


Рис. 2.2. Струменевий млин NETZSCH, модель ConJet: продуктивність – 250 кг/год; $\delta=2-40$ мкм;

Регламент подрібнення наповнювача – прожареного нафтового коксу

1) Подати на лінію завантаження вібромлина, попередньо розмелений у щоківій дробарці кокс до розмірів частинок 3,0 мм, з вмістом фракції ($-0,160$ мм) не більше ніж 15 % мас [68].

2) Подрібнення прожареного нафтового коксу виконувати на вібромлинах AUBEMA в періодичному режимі: завантаження 500 кг у вібромлин, що працює, 5 хв – помел і 5 хв – вивантаження в класифікатор. Подрібнений кокс з бункера-накопичувача вивантажити й подати на ділянку дозування.

3) Контрольний розсів порошку коксу виконувати на ситах 0,250; 0,160; 0,90; 0,070 і 0,045 мм. Навіска порошку коксу – 10 г, тривалість розсіву – 20 хв.

Вміст фракції ($-0,45$) мм у помелі має становити (90–96) % (за мас.), сумарний залишок на ситах 0,250; 0,160 і 0,90 мм – не більше 3,0 % (за мас.).

Для визначення теплофізичних властивостей сипких дрібнозернистих матеріалів, до яких належить подрібнений кокс для виробництва ІГ, розроблено методику числового розв'язання оберненої задачі теплопровідності [78] (додаток А). Також можна скористатися відомостями, наведеними в [79–84].

2.3. Регламент підготовки преспорошку

Технологія одержання дрібнозернистого ІГ передбачає використання преспорошків під час формування заготовок [72, 84]. При цьому вихідні компоненти (наповнювач і зв'язуюче) спочатку змішують за температури, що перевищує температуру плавлення зв'язуючого та отримують композит, який містить наповнювач і зв'язуюче. Далі охолоджений композит подрібнюють та отримують преспорошок. Частинки преспорошку є конгломератом твердих

частинок наповнювача, які склеєні зв'язуючим та мають розміри, що набагато перевищують середній розмір частинок наповнювача [85]. Потім здійснюється ізостатичне пресування, отриманого таким чином преспорошку в заготовки ІГ. Такий спосіб значно поліпшує умови пресування та підвищує однорідність отриманих заготовок. Для технології одержання дрібнозернистого ІГ важливим є не тільки процеси спікання на поверхні наповнювача, але й процеси спікання границях частинок преспорошку.

Стадії підготовки преспорошку для пресування заготовок ІГ передують низка важливих підготовчих етапів, які чітко регламентуються і включають [68]:

1) подрібнення нафтового коксу (п. 2.2) і підготовку пеку ВТП, яка включає його подрібнення до фракції 5 мм;

2) дозування компонентів у кількості 60 % (за мас.) подрібненого нафтового коксу і 40 % (за мас.) пеку ВТП;

3) змішування маси в змішувальній машині. Спочатку в попередньо розігріту машину до (330–360) °С завантажують кокс і перемішують впродовж (15–20) хв. За температури частинок коксу (250–270) °С завантажують пек ВТП і здійснюється змішування протягом (45–60) хв, що забезпечує мінімальні значення коефіцієнта однорідності суміші порядку $K_z=1,5-2,0$. За температури коксопекової композиції (245–270) °С здійснюється її вивантаження зі змішувача. За стандартною методикою визначається вміст летких у композиції, нормальний вміст яких становить (10–12) % (за мас.).

4) одержання преспорошку у вібромліні.

Операцію змішування тонкодисперсного наповнювача з пеком також можна здійснювати в екструдері [86–92].

Приготування преспорошку з охолодженої після змішування коксопекової композиції здійснюється у вібромліні з підігрівом. Розміри готового преспорошку приблизно у два рази мають перевищувати розміри наповнювача.

Преспорошок, отриманий за допомогою вібропомелу, містить агломерати частинок коксу, оточені прошарком зв'язуючого, а також не зв'язані між собою частинки наповнювача і зв'язуючого. Під час пресування такого преспорошку частинки непокритого зв'язуючим коксу контактують одна з одною, що знижує міцність зчеплення частинок у спресованій заготовці, оскільки частинки пеку не утворюють єдиної матриці. Відповідно, міцність заготовок падає, і сили пружної післядії перешкоджають їх усадці.

Позбутися зазначеного недоліку підготовки преспорошку можна на стадії пресування з підігрівом коксопекової композиції до температури, що перевищує температуру роз'якшення пеку. При цьому відбувається часткове змочування частинок наповнювача зв'язуючим, але всередину агломератів частинок наповнювача, що утворилися під час розмолу композиції, пек не потрапляє тільки частково. Міцність заготовок ІГ, отриманих гарячим пресуванням, буде вищою за міцність заготовок, спресованих з преспорошку після вібропомелу на холодну.

Таким чином, велике значення для отримання якісного преспорошку має вибір типу подрібнювача. Так, наприклад, для композиції прожарений кокс+ВТП під час подрібнення після гарячого змішування найкращий результат дає вібростирання або роторний помел.

За критерії, що дають змогу визначити якість преспорошку та прогнозувати усадку заготовки під час випалювання, можна використовувати величину питомої поверхні частинок або автогезії.

Регламент отримання преспорошку для ізостатичного пресування

1) Застиглу коксопекову композицію завантажують у молоткову дробарку і дроблять. Розмір фракції після дроблення – не більше 5 мм [93–97]. Дроблена композиція пневмотранспортом подається в бункер-накопичувач для подальшого подрібнення на вібромлинах.

2) Тонкий помел дробленої коксопекової композиції здійснюють на вібротрилах АУВМА в періодичному режимі: завантаження 500 кг протягом 5 хв у млин, який працює, (3–5) хв – помел, 5 хв – вивантаження (класифікатор не працює). Розмелений преспорошок подається на ділянку пресування.

3) Контрольний розсів преспорошку виконується за стандартною методикою на ситах 0,500; 0,315; 0,250; 0,160 і 0,090 мм.

Вміст фракції (-0,090) мм у помелі має складати не менше 50 % (за мас.), вміст фракції (+0,315) – не більше 2 % (за мас.).

2.4. Моделі формування коксопекових композицій у заготовки

Для оцінювання усадки заготовок ІГ розглянемо дві принципово різні моделі формування (пресування) коксопекових композицій (рис. 2.3) [68]. У першому випадку зерна наповнювача безпосередньо контактують між собою (рис. 2.3,а), а в другому – між зернами перебуває пек (рис. 2.3,б).

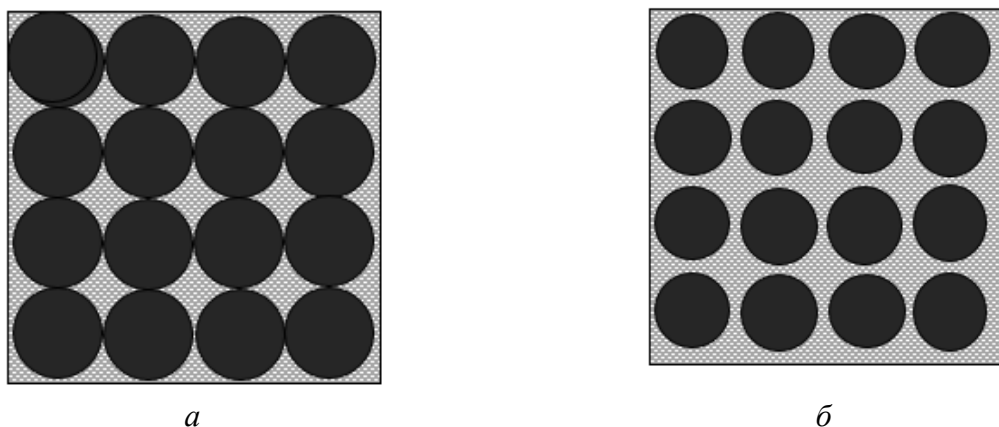


Рис. 2.3. Моделі формування коксопекових композицій: а – безпосередній контакт між зернами наповнювача; б – між зернами наповнювача перебуває зв'язуюче

Розглянемо випадок використання прожареного коксу, температура одержання якого вища за температуру випалювання заготовок. Тоді під час випалювання пржарений наповнювач не піддається змінам, тобто усадці, у той

час як зв'язуюче втрачає частину маси у вигляді летких та крбонізується, даючи коксовий залишок з істинною густиною, приблизно рівною густині прожареного коксу [3]. У першому випадку моделі формування коксопекової композиції (рис. 2.3,а) загальний об'єм системи визначається об'ємом частинок наповнювача і тому під час випалювання не змінюється. У підсумку через втрату маси пеку, за нульових усадок, густина заготовки зменшується. У другому випадку (рис. 2.3,б) завдяки наявності прошарків пеку між частинками наповнювача об'єм заготовки під час випалювання зменшуватиметься. Якщо при цьому втрати маси у відсотковому відношенні не більше від зменшення об'єму, густина заготовки зростатиме.

Для оцінки усадки заготовок у процесі виробництва ІГ розглянемо три різні композиції:

- 1) композиція прожареного коксу з пеком СТП;
- 2) композиція непрожареного коксу з пеком ВТП;
- 3) композиція прожареного коксу з пеком ВТП.

Відомо, що після випалювання об'ємна частка зв'язуючого в коксопексових композиціях становить (15–20) % (у зелених – (30–40) %). Приймаючи, що густина наповнювача і зв'язуючого після випалювання приблизно однакова і складає близько 2000 кг/м³, а після графітування (2200–2270) кг/м³, усадка під час графітування складає (10–15) % (із врахуванням втрат маси (1–3) %). Густина зграфітованої заготовки визначають оберненим перерахунком, при цьому її значення не повинно бути нижче за 1800 кг/м³, густина випаленої заготовки має бути не менше (1550–1600) кг/м³. Зі зростанням температури отримання наповнювача його істинна густина також зростатиме і завдяки цьому усадка заготовок під час графітування зменшуватиметься.

Результати розрахунків за різних коксопексових композицій наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Розрахункові значення усадок заготовок ІГ за різних коксопексових композицій [68]

Склад композиції	Після пресування	Після випалювання		Після графітування	
	Густина (експ.), кг/м ³	Густина (розрах.), кг/м ³	Усадка (розрах.), %	Густина (розрах.), кг/м ³	Усадка (розрах.), %
Прожарений кокс+35 % СТП	1350	1670	30	1500–1550	1,7
Непрожарений кокс+40 % ВТП	1050	1600	45	1650–1900	1,8
Прожарений кокс+40 % ВТП	1450	1700	31	1730–1830	1,93

Виходячи з розглянутої моделі формування коксопекової композиції, усадки головним чином мають залежати від вмісту зв'язуючого в композиції. Однак, як видно з табл. 2.1, дійсні усадки на стадії випалювання можуть більш ніж удвічі відрізнятись від розрахункових значень. Відповідно можна зробити висновок про існування цілої низки чинників, які впливають на усадки заготовок П, що отримані на базі коксопексових композицій. Тому розглянемо вплив технології змішування й підготовки преспорошку на об'ємну формозміну заготовок під час випалу.

Вплив технології змішування на усадки заготовок П.

У процесі змішування дрібно- й тонкодисперсних наповнювачів зі зв'язуючим відбувається низка процесів [1]:

- 1) диспергування наповнювача й руйнування агломерованих частинок, що знаходяться в ньому;
- 2) власне змішування або гомонезація композиції;
- 3) пластикація суміші, тобто процес перемішування суміші наповнювача зі зв'язуючим під дією стискних і зсувних зусиль.

Оптимізація процесу змішування є складною задачею, оскільки умови проходження трьох вищезгаданих процесів не збігаються між собою. Так, диспергування наповнювача краще проходить за низьких температур, коли зв'язуюче перебуває у твердому стані і потребує високої швидкості руху робочих елементів змішувача. Якість змішування або гомогенізації суміші істотно залежить від інтенсивності перемішування, початкової крупності частинок та їх зміни в процесі змішування. Пластикацію, що завершає процес змішування, зазвичай проводять для розплавленого зв'язуючого, поєднуючи різні прийоми розділення перемішуваної маси на мікрооб'єми та інтенсивну механічну дію на них. У процесі змішування виникає взаємодія між наповнювачем і зв'язуючим, що визначається змочуваністю поверхні наповнювача пеком.

Якість змішування оцінюється за величиною коефіцієнта неоднорідності змішування (K_3), який визначається за вмістом летких у пробах масою 0,5 г за формулою [1]

$$K_3 = \frac{100}{C_0} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_0)^2}{n-1}}, \quad (2.4)$$

де C_i – концентрація летких у пробах; C_0 – середня концентрація летких; n – загальна кількість проб.

Результати дослідження впливу тривалості змішування τ на зміну K_3 коксопекової композиції за використання різних способів змішування [68] показали, що за збільшення тривалості змішування коефіцієнт однорідності змішування наближається до значень, близьких до одиниці для всіх розглянутих видів змішувального обладнання: для вібротолкача і шнекового

змішувача за 2–5 хв, для барабанного змішувача, шарового млина, роторного змішувача з Z-подібними лопатями за (30–40) хв.

З даних [68] випливає, що гаряче змішування наповнювача з пеком призводить до найбільшого значення усадки під час випалювання та відповідно густини заготовок.

Густина випалених і зграфітованих заготовок неперервно збільшується зі зростанням вмісту зв'язуючого в композиції. Для заготовок з вмістом зв'язуючого понад 30 % спостерігається стрімке збільшення густини заготовок після випалювання і графітування [68].

У разі спільного вібропомолу наповнювача і зв'язуючого відбувається інтенсивна агломерація тонкодисперсних частинок наповнювача, що заважає рівномірному розподілу зв'язуючого на поверхні кожної частинки наповнювача. Це пояснюється тим, що маса, яка утворюється за спільного помелу у вібромлині, не є зв'язаною коксопековою композицією, лишається мікронеоднорідною і містить значну складову механічної суміші порошків наповнювача і зв'язуючого, дуже слабо зв'язаних між собою [98].

Процеси формування структури полікристалічного графіту на базі тонкодисперсного прожареного коксу в процесі термооброблення можуть відбуватися по-різному, залежно від способу змішування наповнювача зі зв'язуючим. При цьому максимальні усадки спостерігаються для матеріалів, що отримані гарячим змішуванням. Для матеріалів, отриманих спільним помелом, характерним є розширення заготовок на стадії випалювання, що є недоліком, оскільки це призводить до зменшення густини обпалених заготовок ІГ. Однак, незалежно від способу змішування, на стадії графітування спостерігаються значні усадки, що становлять (8–10) % від об'єму випалених заготовок.

2.5. Вимоги до пресованих заготовок.

Регламент пресування заготовок

Пресування заготовок у глуху матрицю або ізостатичне пресування. Ізостатичне пресування є одним з найбільш ефективних способів усунення перепаду тиску й густини в тілі формованої заготовки й мінімізації внутрішнього напруження [99]. Найбільш розповсюдженим й доступним типом пресового обладнання є гідростати [99]. У процесі ізостатичного пресування матеріал, що пресується (преспорошок), розміщують в еластичну (поліуретанову) оболонку й попередньо ущільнюють вібраційним способом. Потім герметизують оболонку й поміщають її в камеру, заповнену гідравлічною рідиною, яка рівномірно передає зовнішній тиск через стінки оболонки до пресованого матеріалу.

Для ізостатичного формування великогабаритних заготовок діаметром 600 мм і завдовжки 2000–2500 мм тонкозернистого ІГ достатньо використовувати преси з зусиллям 150–200 МПа, з робочою камерою діаметром 800 мм і заввишки біля 2500–2800 мм. Крім того, на етапі попереднього ущільнення для підвищення якості одержуваних заготовок ІГ треба додатково вакуумувати преспорошок та використовувати «гаряче» ізостатичне формування заготовок.

Технології отримання конструкційних ІГ четвертого і п'ятого поколінь мають базуватися на спеціально відпрацьованій сукупності технологічних прийомів, включаючи ізостатичне пресування, які дають змогу регулювання усадками заготовок на всіх стадіях термооброблення таким чином, щоб забезпечити підвищені властивості кінцевого продукту за знижених термічних напружень під час термообробки.

Регламент пресування великогабаритних заготовок ізостатичного графіту

Під великогабаритними заготовками мається на увазі заготовки діаметром 600 мм і завдовжки до 2500 мм.

1) Еластична оболонка заповнюється преспорошком і виконується його ущільнення вібраційним способом.

2) Оболонка з ущільненим порошком розміщується в камері, заповненій гідравлічною рідиною, яка у свою чергу розміщується в гідростаті, після чого здійснюється пресування зусиллям (150–200) МПа. Для підвищення якості пресування можлива організація підігріву гідравлічної рідини до температур від 100 °С до 150 °С.

3) Визначається густина заготовок після пресування. Значення густини має становити від 1400 кг/м³ до 1450 кг/м³.

4) У разі пресування циліндричних заготовок діаметром не більше 300 мм і завдовжки 1000 мм можливе застосування методу пресування в матрицю за тиску 100 МПа.

Для дослідження напружено-деформованого стану під час пресування заготовок ІГ можна скористатися моделлю Друкера–Прагера (додаток Б) [100], що описує поведінку сипкого матеріалу в континуальному наближенні.

2.6. Фізичні властивості «зелених» заготовок з різним фракційним та матеріальним складом

Результати дослідження фізико-механічних властивостей «зелених» заготовок ізостатичного графіту (після пресування) з різним матеріальним і гранулометричним складом [68] наведено в табл. 2.2.

Аналіз даних табл. 2.2 свідчить про те, що:

1) застосування непрожареного коксу (марка В) призводить до найнижчого значення густини заготовок ІГ. Коефіцієнт теплопровідності, модуль пружності і граничні значення напружень на стискання і розтяг заготовок марки В майже вдвічі менші порівняно із заготовками марки А;

2) зменшення середнього розміру зерна наповнювача удвічі (марка Б) помітно впливає тільки на λ , E , σ_c і σ_p порівняно з маркою А;

3) вплив зміни пеку встановити важко, оскільки цей вплив проявляється тільки під час випалювання за високих температур;

4) дані табл. 2.2 необхідні для визначення впливу габаритних розмірів «зелених» заготовок на їхню міцність, а також складу коксопекової композиції за допомогою числового аналізу напружено-деформованого стану (НДС).

Таблиця 2.2. Фізико-механічні властивості «зелених» заготовок ізостатичного графіту за різного матеріального і гранулометричного складу [68]

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$E, \text{ГПа}$	$\sigma_c, \text{МПа}$	$\sigma_p / \sigma_p^*, \text{МПа}$
Марка А – прожарений кокс (30 мкм)+35 % (за мас.) СТП						
20	1460	670	1,2	4,0	19,6	4,9/6,5
Марка Б – прожарений кокс (15 мкм)+40 % (за мас.) ВТП						
20	1420	570	0,6	3,8	12,0	3,1/4,0
Марка В – непрожарений кокс (30 мкм)+40 % (за мас.) ВТП						
20	1060	540	0,52	2,8	10,0	2,5/3,3

2.7. Математична модель напружено-деформованого стану заготовок ізостатичного графіту

Система стаціонарних диференціальних рівнянь задачі напружено-деформованого стану – статичної пружності для ізотропного матеріалу включає рівняння руху й рівноваги, геометричне рівняння – тензор малих деформацій та фізичне рівняння – узагальнений закон Гука [101]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \hat{\sigma} + \rho \mathbf{b} = 0; \\ \hat{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\mathbf{u} \nabla + \nabla \mathbf{u}); \\ \hat{\sigma} = \frac{E}{1+\nu} \left(\hat{\varepsilon} + \frac{\nu}{1-2\nu} \hat{\mathbf{I}} \text{tr}(\hat{\varepsilon}) \right), \end{array} \right. \quad (2.5)$$

де $\nabla = \mathbf{e}_j \frac{\partial}{\partial x_j}$, $i, j = 1, 2, 3$ – оператор Гамільтона, м^{-1} ; $\mathbf{x} = x_i \mathbf{e}_i$, $i = 1, 2, 3$ – вектор

декартових координат, м; (\cdot) – оператор скалярного добутку тензорів;

$\hat{\sigma} = \sigma_{ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j$, $i, j = 1, 2, 3$ – симетричний тензор напруження другого рангу, Па;

$\nabla \cdot \hat{\sigma} = \mathbf{e}_j \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (\sigma_{ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} \mathbf{e}_i (\mathbf{e}_j \cdot \mathbf{e}_j)) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \mathbf{e}_i = \sigma_{ij,j} \mathbf{e}_i$, $i, j = 1, 2, 3$ – частинна

похідна від тензора напруження (або скалярний добуток оператора Гамільтона на тензор напруження), Па/м; ρ – густина, кг/м^3 ; $\mathbf{b} = b_i \mathbf{e}_i$, $i = 1, 2, 3$ – вектор

масових гравітаційних сил, Н/кг; $\hat{\varepsilon} = \varepsilon_{ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j$, $i, j = 1, 2, 3$ – симетричний тензор другого рангу пружних деформацій; $\mathbf{u} = u_i \mathbf{e}_i$, $i = 1, 2, 3$ – вектор переміщення, м;

$\nabla \mathbf{u} = \mathbf{e}_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \mathbf{e}_i = u_{i,j} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j$, $i, j = 1, 2, 3$ – частинна похідна від вектора переміщення

(або тензорний добуток оператора Гамільтона на вектор); E – модуль пружності, Па; ν – коефіцієнт Пуассона; $\hat{\mathbf{I}}$ – одиничний тензор другого рангу; $\text{tr}(\cdot)$ – оператор сліду тензора.

У разі термопружної задачі для ізотропного середовища узагальнений закон Гука набуває дещо іншого вигляду

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\varepsilon_{ij}^e - \varepsilon_{ij}^T), \quad (2.6)$$

де C^{ijkl} – компоненти тензора 4-го рангу пружності, Па; ε_{ij}^e – компоненти тензора малих пружних деформацій Коші; $\varepsilon_{ij}^T = \alpha(T - T_0)\delta_{ij}$ – компоненти тензора температурних деформацій; α – КТР матеріалу, K^{-1} ; T_0 і T – початкова і поточна абсолютна температура тіла, відповідно, К; δ_{ij} – символ Кронекера.

Для однозначності системи диференціальних рівнянь (2.5) треба лише записати граничні умови. Оскільки задача стаціонарна, то початкові умови не використовуються. Винятком є температура при врахуванні температурного навантаження (2.6), яка може бути задана як різниця $T - T_0$ для визначення тензора температурної деформації $\varepsilon_{ij}^T = \alpha(T - T_0)\delta_{ij}$.

Граничні умови для (2.5):

– переміщення або защемлення (має бути задано хоча б в одній точці на поверхні тіла)

$$\mathbf{u}|_{S_u} = 0, \quad (2.7)$$

де S_u – поверхня (або точка поверхні), на якій задано переміщення, m^2 ;

– симетрія

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}|_{S_{su}} = 0, \quad (2.8)$$

де $\mathbf{n} = n_i \mathbf{e}_i$, $i=1,2,3$ – вектор зовнішньої нормалі до поверхні тіла; S_{su} – поверхня симетрії тіла, m^2 ;

– зовнішній тиск

$$(\hat{\sigma} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}|_{S_p} = p, \quad (2.9)$$

де p – зовнішній тиск, який задано на поверхні S_p , Па;

– зовнішня сила, що прикладена в деякій точці тіла

$$\mathbf{F}_P = \int_{\Delta S_p} \hat{\sigma} \cdot \mathbf{n} dS, \quad (2.10)$$

де $\mathbf{F}_P = F_i^P \mathbf{e}_i$, $i=1,2,3$ – вектор зовнішньої сили в точці P , Н; ΔS_p – елементарна площадка поверхні тіла в околі точки P , m^2 ;

Оскільки матеріал Π відноситься до крихких матеріалів, то для визначення еквівалентного напруження за критерієм Мора σ_{eqM} [102]

$$\sigma_{eqM} = \sigma_1 - \left[\frac{\sigma^+}{\sigma^-} \right] \sigma_3, \quad (2.11)$$

де σ_1, σ_3 – головні максимальне та мінімальне напруження, відповідно, Па;
 $[\sigma^+] = \sigma_p^*$ – границя міцності матеріалу під час одновісного розтягу (згину), Па;
 $[\sigma^-] = \sigma_c$ – границя міцності матеріалу під час одновісного стискання, Па.

Співвідношення для визначення запасу міцності F_s мають вигляд

$$F_s = \left[\frac{\sigma_1}{[\sigma^+]} - \frac{\sigma_3}{[\sigma^-]} \right]^{-1} \vee F_s = \frac{[\sigma^+]}{\sigma_{eqM}}, \quad (2.12)$$

де σ_{eqM} – еквівалентне напруження за критерієм Мора, Па.

Математична постановка (2.5)–(2.12) використовувалася для визначення впливу габаритних розмірів «зелених» заготовок на їхню міцність, а також складу коксопекової композиції за допомогою числового аналізу напружено деформованого стану. При цьому числова методика розв’язання сформульованої задачі НДС базується на методі скінченних елементів (МСЕ). Для дослідження НДС «зелених» заготовок ІГ використовувалося програмне забезпечення авторської розробки [103].

2.8. Раціональний склад пресової композиції та енергоефективний регламент її пресування

За головні критерії для вибору раціонального складу пресової композиції для пресування заготовок ІГ можуть бути обрані такі:

- енерговитрати на подрібнення наповнювача не більше 10 кДж/г;
- забезпечення змочування поверхні наповнювача зв’язуючим на етапах змішування і приготування преспорошку;
- густина пресованих заготовок для забезпечення найвищого її значення більше 1700 кг/м³ після випалювання;
- характеристики міцності «зелених» заготовок σ_c, σ_p для забезпечення їх цілісності під час транспортування;
- здатність до усадки під час випалювання не менше 30 %;
- середній розмір зерна наповнювача має забезпечувати найнижчі значення ПЕО і КТР готового продукту (не більше 13–14 мкОм·м і $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, відповідно).

Виходячи аналізу світового виробництва ІГ та даних табл. 2.1, 2.2 найбільшою мірою можна забезпечити виконання сформульованих критеріїв у разі використання такого матеріального і гранулометричного складу коксопекової композиції:

- наповнювач – прожарений (за температури (1300–1500) °С) нафтовий кокс голчастої структури з середнім розміром зерна $\delta_c = 15; 30$ мкм, що забезпечує енерговитрати на подрібнення наповнювача не більше 10 кДж/г;
- зв’язуюче – високотемпературний пек з вмістом дисперсної фази у вигляді первинної α_1 -фракції (до 25–30 %) у поєднанні з ароматичними речовинами [72]. Наявність у пеку ВТП тонкодисперсної фази на початку

процесу випалювання сприяє утворенню жорсткої пекової матриці, яка і забезпечує достатньо високу жорсткість коксопекової композиції [73].

Такому раціональному складу відповідає коксопекова композиція марки А, Б, що наведена в табл. 2.2.

Підвищення енергоефективності пресування заготовок ІГ разом з підвищенням їхніх фізико-механічних властивостей можна досягти за рахунок організації, попереднього віброущільнення й вакуумування преспорошку, «м'якого» підігріву до 150 °С гідравлічної рідини під час ізостатичного пресування або матриці під час пресування в матрицю. Для подальшого підвищення енергоефективності процесу пресування заготовок ІГ підігрів гідрорідини для ізостатичного пресування можна виконувати за рахунок теплоти коксопекової композиції після її змішування за температури 270 °С у процесі охолодження композиції перед її подрібненням.

2.9. Вплив габаритних розмірів заготовок на склад преспорошку коксопекової композиції та регламент їх пресування

Вплив габаритних розмірів заготовок на склад преспорошку коксопекової композиції можна визначити за допомогою розв'язання задачі НДС у разі гравітаційного й силового навантаження (п. 2.7) за різного гранулометричного та матеріального складу композиції (табл. 2.2) і різних габаритних розмірів «зелених» заготовок ІГ (рис. 2.4–2.7).

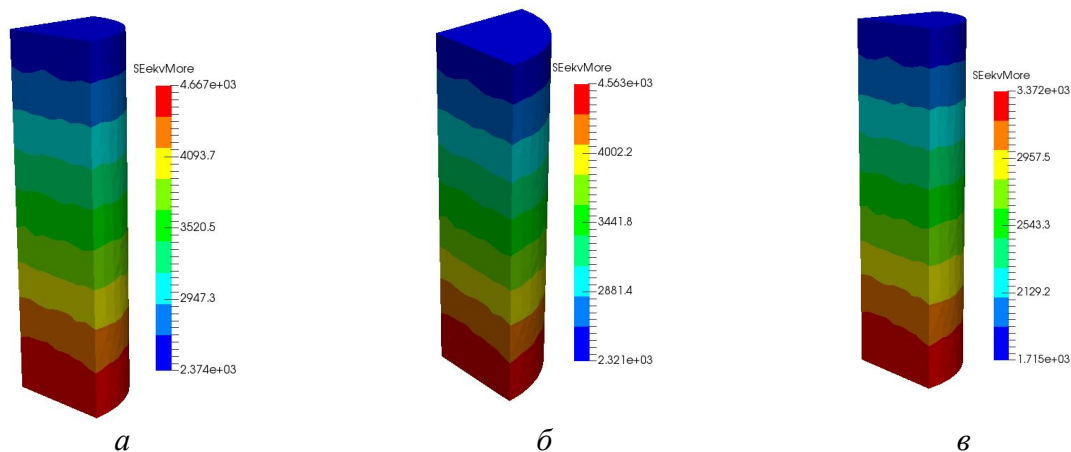


Рис. 2.4. НДС «зелених» заготовок діаметром 300 мм і завдовжки 1000 мм різного гранулометричного та матеріального складу коксопекової композиції під час гравітаційного навантаження: *а* – прожарений кокс (30 мкм)+35 % (за мас.) СТП, мінімальний запас міцності $F_{smin} \gg 1$ (1393); *б* – прожарений кокс (15 мкм)+40 % ВТП, $F_{smin} \gg 1$ (877); *в* – непрожарений кокс (30 мкм)+35 % (за мас.) ВТП, $F_{smin} \gg 1$ (979)

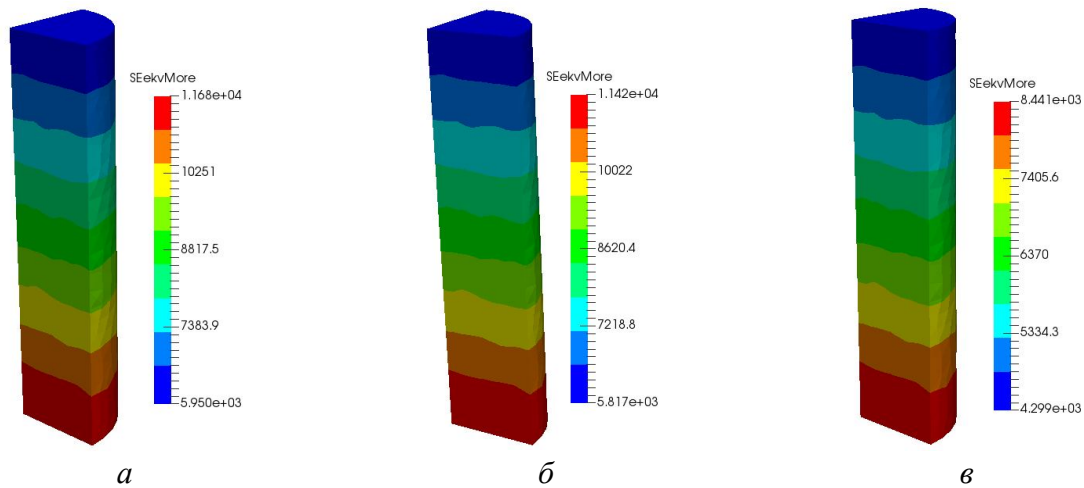


Рис. 2.5. НДС «зелених» заготовок діаметром 600 мм і завдовжки 2500 мм різного гранулометричного та матеріального складу коксопекової композиції під час гравітаційного навантаження (поле еквівалентного напруження за Мором): *а* – прожарений кокс (30 мкм)+35 % (за мас.) СТП, мінімальний запас міцності $F_{smin} \gg 1$ (556); *б* – прожарений кокс (15 мкм)+40 % (за мас.) ВТП, $F_{smin} \gg 1$ (350); *в* – непрожарений кокс (30 мкм)+35 % (за мас.) ВТП, $F_{smin} \gg 1$ (391)

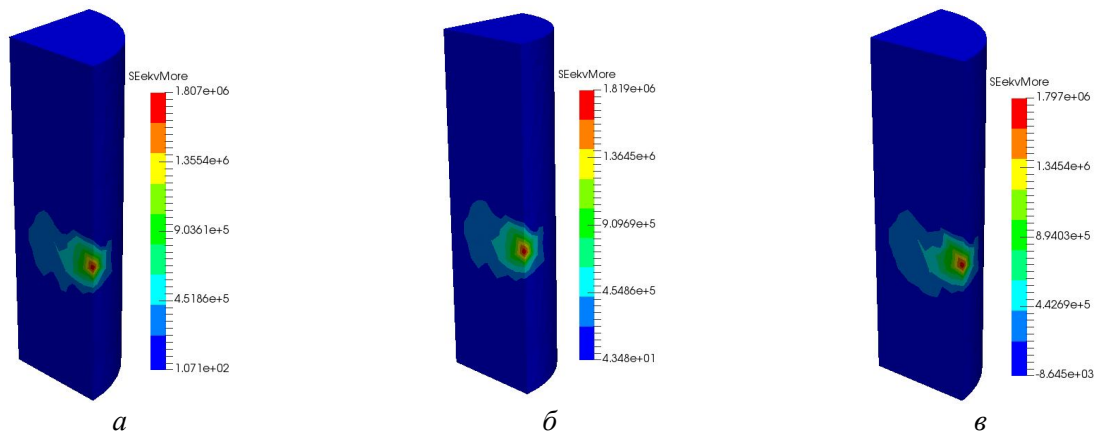


Рис. 2.6. НДС «зелених» заготовок діаметром 300 мм і завдовжки 1000 мм різного гранулометричного та матеріального складу коксопекової композиції під час гравітаційного і точкового силового навантаження 4000 Н (поле еквівалентного напруження за Мором): *а* – прожарений кокс (30 мкм)+35 % (за мас.) СТП, $\sigma_{eqM} > 0$; *б* – прожарений кокс (15 мкм)+40 % (за мас.) ВТП, $\sigma_{eqM} > 0$; *в* – непрожарений кокс (30 мкм)+35 % (за мас.) ВТП, $\sigma_{eqM} < 0 \wedge \sigma_{eqM} > 0$

З аналізу результатів розрахунків НДС «зелених» заготовок ІГ можна встановити такий вплив габаритних розмірів заготовок на склад коксопекової композиції:

1) вплив габаритних розмірів «зелених» заготовок на вибір типу пеку СТП або ВТП встановити не вдалося, оскільки цей вплив можливо встановити тільки під час випалювання. Однак можна стверджувати, що менша частка пеку в композиції (35 % (за мас.) порівняно з 40 % (за мас.)) дещо підвищує міцність спресованих заготовок;

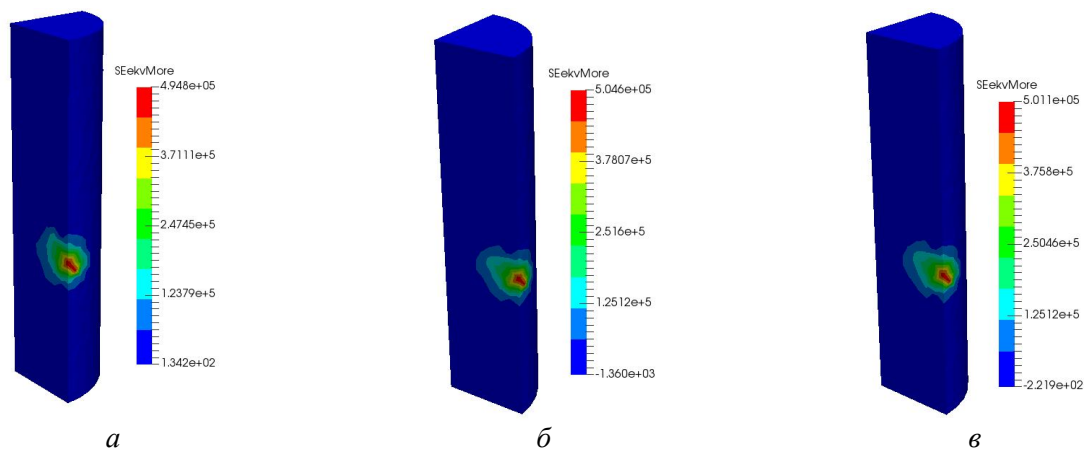


Рис. 2.7. НДС «зелених» заготовок діаметром 600 мм і завдовжки 2500 мм різного гранулометричного та матеріального складу коксопекової композиції під час гравітаційного навантаження і точкового силового навантаження 4000 Н (поле еквівалентного напруження за Мором): *а* – прожарений кокс (30 мкм)+35 % (за мас.) СТП, $\sigma_{eqM} > 0$; *б* – прожарений кокс (15 мкм)+40 % (за мас.) ВТП, $\sigma_{eqM} < 0 \wedge \sigma_{eqM} > 0$;
в – непрожарений кокс (30 мкм)+35 % (за мас.) ВТП, $\sigma_{eqM} < 0 \wedge \sigma_{eqM} > 0$

2) зі збільшенням габаритних розмірів «зелених» заготовок, зокрема, їхнього діаметра від 300 мм (рис. 2.4) до 600 мм (рис. 2.5) запас міцності вертикально встановлених заготовок під час гравітаційного навантаження зменшується приблизно у 2,25–2,5 рази, але при цьому лишається набагато більшим одиниці, тобто умова міцності не порушується;

3) у разі спільної дії гравітаційного і силового точкового навантаження на «зелені» заготовки ІГ (рис. 2.6, 2.7) заготовки діаметром 300 мм не втрачають міцності за марок коксопекової суміші А і Б (див. табл. 2.2), у той час як заготовки діаметром 600 мм не втрачають своєї міцності тільки в разі марки А.

На підставі отриманих даних НДС заготовок більш корисним для технології є встановлення впливу складу коксопекової композиції на міцність «зелених» заготовок різних габаритних розмірів (див. рис. 2.4–2.7):

1) використання непрожареного коксу (марка композиції В (див. табл. 2.2)) порівняно з маркою А з прожареним коксом призводить до зменшення міцності заготовок під дією гравітаційного навантаження приблизно у 1,5 рази, але не спричинює їх можливого руйнування у вигляді тріщин і сколів. Під час точкового силового навантаження заготовки спресовані з композиції марки У зовсім втрачають міцність, оскільки еквівалентні напруження за Мором змінюють свій знак (див. рис. 2.6, 2.7);

2) зменшення діаметра зерна наповнювача від 30 мкм до 15 мкм (марки А і Б, відповідно, (див. табл. 2.2)) також призводить до аналогічних результатів;

3) зі збільшенням габаритних розмірів «зелених» заготовок ІГ, зокрема, їх діаметра від 300 мм до 600 мм показники міцності останніх значно знижуються. Наприклад, під час точкового силового навантаження заготовки діаметром 300 мм втрачають свою міцність у разі використання коксопекової композиції

тільки марки В (див. табл. 2.2), у той час як заготовки діаметром 600 мм втрачають свою міцність вже для марок композиції Б і В.

Для зменшення ймовірності руйнування заготовок ІГ під час випалювання, заготовки необхідно розміщувати горизонтально в робочому просторі випалювальної печі

Вплив габаритних розмірів заготовок ІГ на регламент їх пресування розглядається в п. 2.5. З регламенту пресування (див. п. 2.5) випливає, що для великогабаритних заготовок діаметром 600 мм і заввишки 2500 мм слід використовувати ізостатичне пресування, а для заготовок діаметром до 300 мм і висотою 1000 мм – можна застосовувати пресування в матрицю.

2.10. Висновки до розділу 2

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1) За наповнювач для одержання заготовок тонкозернистого ІГ високої густини необхідно використовувати прожарений кокс, а за зв'язуюче – високотемпературний пек із вмістом первинної α -фракції (до 25–30 %).

2) Для підготовки коксопекової композиції необхідно застосовувати гаряче змішування.

3) Процес одержання порошку із коксопекової композиції – тонкого подрібнення маси необхідно виконувати таким чином, щоб руйнування її шматків не призводило до відшарування пеку від частинок наповнювача.

4) Виконання перших трьох умов дає змогу отримати композицію, здатну до максимальних усадок під час термооброблення. Слід зазначити, що під час випалювання негативним фактором, який знижує усадку, є пружне розширення маси, роль якого зі зменшенням розмірів зерна наповнювача збільшується.

5) Для мінімізації впливу пружного розширення і незадовільної якості преспорошку (наявність частинок непокритого зв'язуючим коксу) необхідно застосовувати гаряче пресування [68].

6) Виконання вищезазначених вимог має забезпечити отримання на базі прожареного коксу і пеку ВТП заготовки ІГ з густиною порядку 1900 кг/м^3 , що відповідає кращим маркам дрібно- і тонкозернистого ІГ зарубіжного виробництва.

7) Зі збільшенням габаритних розмірів «зелених» заготовок ІГ, зокрема, їх діаметра від 300 мм до 600 мм, показники міцності останніх значно знижуються. Наприклад, під час точкового силового навантаження заготовки діаметром 300 мм втрачають свою міцність у разі використання коксопекової композиції тільки марки В (див. табл. 2.2), у той час як заготовки діаметром 600 мм втрачають свою міцність вже для марок композиції Б і В.

8) Для формування великогабаритних заготовок діаметром 600 мм і завдовжки 2500 мм треба застосовувати ізостатичне пресування, а для заготовок діаметром до 300 мм і довжиною 1000 мм – можна використовувати спосіб пресування в матрицю.

3. ФІЗИЧНА, МАТЕМАТИЧНА ТА ЧИСЛОВА МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДІЛУ ВИПАЛЮВАННЯ ЗАГОТОВОК ІЗОСТАТИЧНОГО ГРАФІТУ

Під час процесів високотемпературного оброблення заготовок ІГ, а саме випалювання і графітування, відбувається ціла низка фізико-хімічних процесів, у результаті яких формується структура ІГ. Ці процеси супроводжуються зміною геометричних розмірів заготовок і фізико-механічних властивостей матеріалу [3, 9, 104, 105]. Тривалість стадій термооброблення становить близько (50–80) % від загальної тривалості технологічного циклу виробництва ІГ та зазвичай супроводжується значною кількістю браку через виникнення тріщин і сколів у заготовках. Особливо це стосується процесу випалювання високоусаджуваних композицій ІГ за великих габаритів заготовок.

Тому перед формулюванням фізичної, математичної й числової моделей процесу випалювання необхідно визначитися з раціональними режимами випалювання заготовок ІГ (граничними значеннями градієнтів температур і темпу нагрівання), які гарантують їх цілісність, та підібрати пічне обладнання, що забезпечує реалізацію цих режимів.

3.1. Визначення раціональних режимів випалювання заготовок ізостатичного графіту

Оцінка допустимих перепадів температур під час випалювання на підставі розрахунків міцності заготовок ІГ.

Нормальні компоненти тензора термічного напруження, що виникають під час повільного, осесиметричного нагрівання циліндричної заготовки ІГ, можуть бути розраховані за такими аналітичними залежностями [106]:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{\alpha E}{4(1-\nu)} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \Delta t; \\ \sigma_\theta = \frac{\alpha E}{4(1-\nu)} \left(1 - 3 \frac{r^2}{R^2} \right) \Delta t; \\ \sigma_z = \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \left(1 - 2 \frac{r^2}{R^2} \right) \Delta t, \end{cases} \quad (3.1)$$

де σ_r , σ_θ , σ_z – компоненти тензора термічного напруження для радіального, тангенціального і осьового напрямків, відповідно, Па; α – КТР, K^{-1} ; $\sigma_z = \sigma_r + \sigma_\theta$; E – модуль пружності, Па; ν – коефіцієнт Пуассона; r – поточний радіус, м; R – радіус заготовки, м; Δt – радіальний перепад температури заготовки, $^{\circ}C$.

З використанням аналітичних виразів для компонент тензора напруження та умов міцності нескладно визначити допустимі радіальні перепади температур по заготовках і допустимий темп їх нагрівання в процесі термооброблення. Оскільки для ІГ границя міцності на розтяг σ_p завжди

менша від границі міцності на стискання σ_c , з умови $\sigma_z \leq \sigma_p$ можна отримати гранично допустиму різницю температури в радіальному напрямку заготовки для $\frac{r^2}{R^2} = 1$ за залежністю

$$\Delta t_{\max} \leq \frac{2\sigma_p(1-\nu)}{\alpha E}. \quad (3.2)$$

Максимально допустима швидкість нагрівання заготовок $V_{t \max}$ виражається нерівністю

$$V_{t \max} \leq \sigma_p \frac{8a(1-\nu)}{\alpha E R^2}, \quad (3.3)$$

де $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, м²/с; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); c_p – масова ізобарна теплоємність, Вт/(кг·К); ρ – густина, кг/м³.

Відомо, що найбільш критичними до швидкості нагрівання під час випалювання є заготовки з дрібнозернистого графіту. Під час випалювання заготовок із середньозернистого графіту спостерігаються менші величини усадки та до температурно-часових параметрів ставляться менш жорсткі вимоги [105], ніж до заготовок ІГ.

Фізико-механічні властивості заготовок ІГ залежно від температури термооброблення (табл. 3.1) необхідні для відпрацювання раціональних регламентів випалювання за допомогою числового моделювання.

Значення гранично допустимої різниці температури Δt_{\max} у радіальному напрямку заготовки та максимально допустимої швидкості нагрівання заготовок $V_{t \max}$, розраховані за формулами (3.2), (3.3) з використанням даних табл. 3.1, наведені в табл. 3.2.

За даними табл. 3.1 видно, що масова ізобарна теплоємність заготовок підвищується зі збільшенням температури обробки заготовок. Коефіцієнт теплопровідності пресованих заготовок складає близько 1 % від коефіцієнта теплопровідності графіта і в результаті випалювання збільшується більше ніж утричі.

Міцність заготовок (див. табл. 3.1) лишається достатньо низькою до температури оброблення 500 °С, після чого збільшується приблизно у п'ять разів за температури 900 °С. При цьому модуль пружності збільшується приблизно удвічі на інтервалі зміни температур від 500 °С до 900 °С. Міцність на розрив заготовок ІГ, яка необхідна для розрахунків НДС, визначалася за формулою $\sigma_p^* = \sigma_c / 3$.

Таблиця 3.1. Фізико-механічні властивості заготовок ІГ (прожарений кокс ($\delta_c = 15$ мкм)+40 % ВТП) на стадії випалювання [68]

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$E, \text{ГПа}$	$\sigma_c, \text{МПа}$	$\sigma_p / \sigma_p^*, \text{МПа}$	$\Delta/l, \%$
20	1460	0,67	0,60	3,8	12,0	3,1/4,0	0,0
100	1380	0,95	0,77	5,0	12,0	3,1/4,0	1,8
200	1450	1,18	0,90	8,4	20,6	5,3/6,9	-0,7
300	1450	1,35	1,10	8,5	30	7,6/10	-1,1
400	1430	1,45	1,22	8,0	22,5	5,7/7,5	-1,2
500	1460	1,52	1,40	7,7	17,5	4,5/5,8	-1,8
600	1450	1,60	1,58	8,8	37,5	9,5/12,5	-2,3
700	1520	1,75	1,70	11,2	75,0	19,1/25	-3,9
800	1560	1,84	1,90	13,9	90,0	22,9/30	-4,6
900	1620	1,90	2,05	16,6	105,0	26,7/35	-6,3

Примітка: Коефіцієнт Пуассона ІГ $\nu=0,20-0,27$; $\sigma_p^* = \sigma_c/3$ – міцність на розрив, що використовується для розрахунків на міцність; $\alpha = 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ – КТР заготовок.

Таблиця 3.2. Гранично допустимі значення радіальної різниці температур/градієнта температури і темпу підйому температури під час випалювання заготовок ІГ $\varnothing 600$ мм (прожарений кокс (15 мкм)+40 % ВТП)

$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\max}, ^\circ\text{C/grad } t, \text{K/м}$	$V_{t \max}, \text{K/год}$
200	4,2/14	0,32
300	6,0/20	0,56
400	4,8/16	0,49
500	3,8/12,6	0,46
600	7,2/24	0,97
700	11,4/38	1,63
800	11,0/ 36,6	1,77
900	10,8/36	1,87

Примітка: У розрахунках не враховано вплив інтервал температур з інтенсивним газовиділенням летких із заготовок ІГ

Аналіз даних табл. 3.2 показує, що згідно з вимогами міцності допустимі радіальні перепади температур під час випалювання заготовок ІГ $\varnothing 600$ мм на інтервалі температур від 500°C до 900°C монотонно зростають від 4°C до 11°C (радіальні градієнти температур зростають від 12 K/м до 36 K/м). Похибка визначення гранично допустимих перепадів температур у заготовках із врахуванням похибки фізико-механічних властивостей оцінюється в межах 30% .

Використовуючи дані табл. 3.2, можна оцінити тривалість процесу випалювання заготовок ІГ $\varnothing 600$ мм. У результаті нескладних розрахунків встановлено, що тривалість процесу випалювання заготовок $\varnothing 600$ мм має становити близько від 700 год до 800 год.

Граничні значення перепадів температури в заготовках також можна визначити за допомогою числового аналізу їхнього НДС (див. п.2.7, 2.9). На

відміну від аналітичного розв'язку (3.2) за допомогою числового моделювання НДС заготовок можна досліджувати спільний вплив радіального та осьового перепадів температур на міцність виробів ІГ під час випалювання та взагалі вплив несиметричного поля температур. Результати числового аналізу НДС під час випалювання великогабаритних заготовок ІГ, що отримано з використанням даних табл. 3.1, 3.2, наведено на рис. 3.1, 3.2.

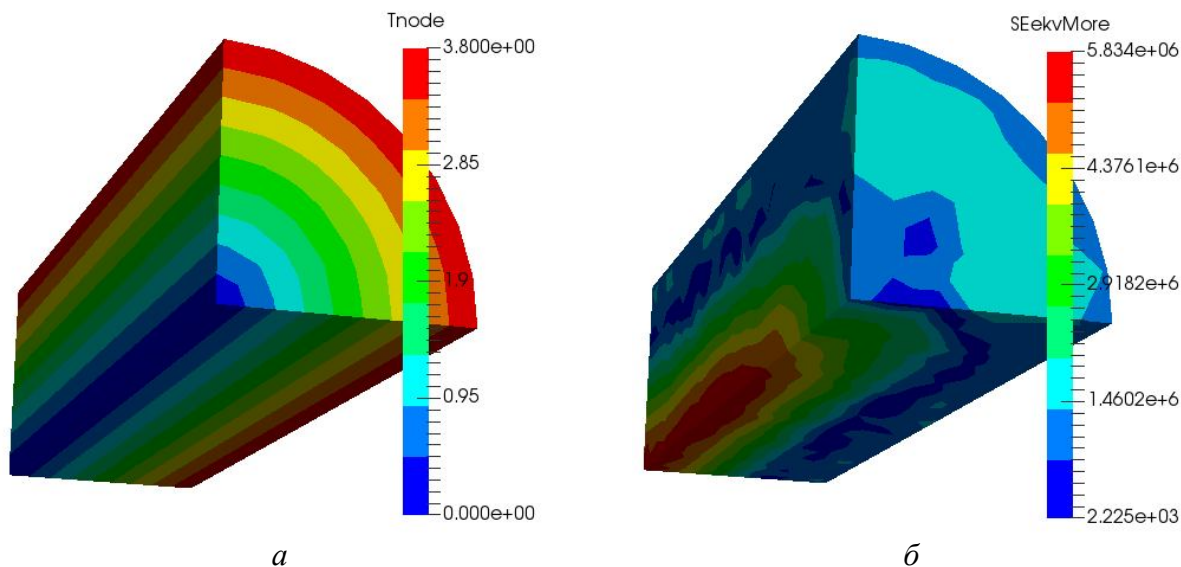


Рис. 3.1. Поле температурного навантаження і еквівалентного напруження за Мором під час випалювання заготовок ІГ Ø600 мм на рівні температур випалу 500 °С:

a – поле радіального температурного навантаження, $\Delta t_{\max} = 3,8$ °С;

б – поле еквівалентного напруження за Мором, $F_{s\min} > 1$, $F_{s\max} = 132$

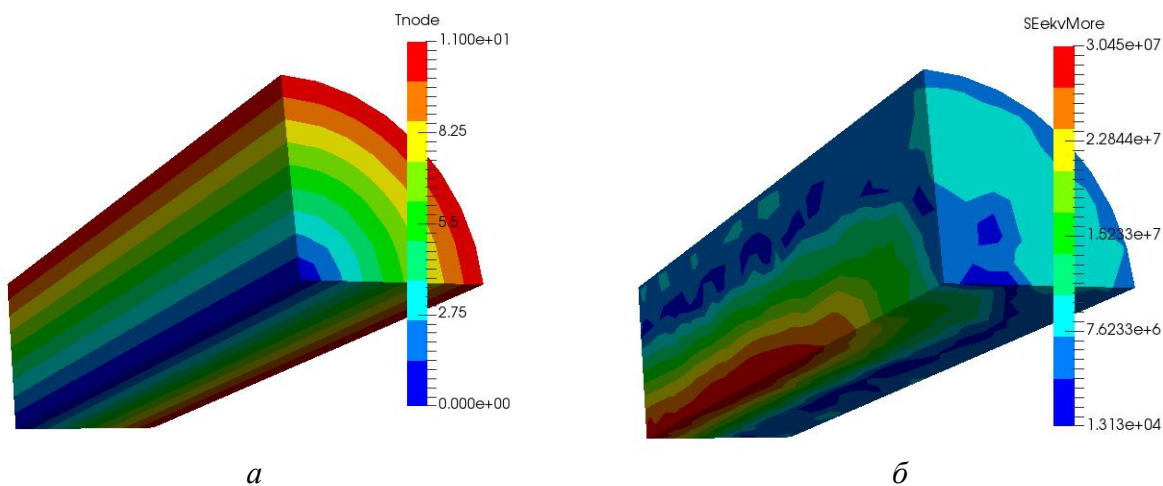


Рис. 3.2. Поле температурного навантаження і еквівалентного напруження за Мором під час випалювання заготовок ІГ Ø600 мм на рівні температур випалу 800 °С:

a – поле радіального температурного навантаження, $\Delta t_{\max} = 11$ °С;

б – поле еквівалентного напруження за Мором, $F_{s\min} > 1$, $F_{s\max} = 55$

Результати моделювання НДС заготовок ІГ під дією температурного навантаження (рис. 3.1, 3.2) добре збігаються з даними аналітичного розв'язку (див. табл. 3.2), що є підтвердженням їх достовірності.

3.2. Вибір пічного обладнання для випалювання заготовок ізостатичного графіту

Наразі найкращим обладнанням для випалювання «зелених» заготовок на ПрАТ «Укрграфіт» є кільцеві печі Рідгамера. Одним із самих «м'яких» режимів випалювання на цих печах є режим з тривалістю 400 год, за яким випалюють звичайні графітові заготовки діаметром (500–600) мм, які є майже безусадковими. Застосовувати такі режими до випалювання високоусадкових заготовок ІГ є неприйнятним. Оскільки випалювання заготовок ізостатичного графіту діаметром понад 200–500 мм у багатокамерних печах Рідгамера є неможливим із-за великої тривалості процесу, тому для цього необхідно застосовувати однокамерні електропечі з викочуваним подом, які забезпечують градієнт температури в заготовках не більше 10–36 К/м, залежно від рівня температури випалювання. Електропечі поряд з низьким значенням градієнтів температур у робочому просторі печі також дають змогу легко забезпечувати будь-які режими підйому температури, зокрема, такі, які були розраховані для великогабаритних заготовок ІГ (табл. 3.2).

Базуючись на даних аналізу раціональних режимів випалювання заготовок ізостатичного графіту (п. 3.1) і даних інтернет-ресурсів, було здійснено вибір пічного обладнання для випалу виробів ІГ виробництва фірми ElectroTherm Industry, яке має забезпечити такі температурні умови процесу термооброблення високоусадкових графітових матеріалів, що мінімізують ймовірність утворення тріщин та сколів останніх. До такого обладнання можна віднести електропіч з викочуваним подом марки ELCB–33600/1300 (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Електропіч з викочуваним подом марки ELCB–33600/1300 виробництва фірми ElectroTherm Industry

Технічні характеристики електропечі з викочуваним подом марки ELCB–33600/1300 наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Технічні характеристики електропечі з викочуваним подом марки ELCB–33600/1300 ElectroTherm Industry

Ефективний робочий простір	мм	3000×7000×1600
Об'єм	л	33600
Макс. температура	°С	1300
Рівномірність температури	°С	менше ± 6
Електрична потужність	кВт	1120

3.3. Фізична і математична моделі процесу випалювання заготовок ізостатичного графіту в електропечах з викочуваним подом

Перед тим як сформулювати математичну модель електропечі з викочуваним подом необхідно мати чітке уявлення про конструкцію печі та фізичні процеси, що відбуваються в печі під час випалювання заготовок ІГ.

Фізичну модель електропечі з викочуваним подом можна сформулювати таким чином. Для цього розглянемо спрощену конструкції електропечі, розраховану на одну заготовку ІГ (рис. 3.4), яка складається з бічних стінок і склепіння 1, газового простору печі між бічними стінками, склепінням і контейнером 2, викочуваного поду 3, контейнера з вуглецевим сипким матеріалом 4 і «зеленої» заготовки ІГ 5, розміщеної в цьому контейнері. Бічні стінки, склепіння і викочуваний під печі складаються з двох шарів: внутрішнього шару – вогнетриву й зовнішнього – теплоізолятора. Для збереження своєї форми під час розм'якшення зв'язуючого в процесі випалювання заготовка ІГ спеціально поміщається в сипкий вуглецевий матеріал (пересипку), який виконує функцію жорсткого середовища. Нагрівання печі здійснюється за рахунок електричних спіральних нагрівників, розміщених у керамічних плитках на повздовжніх бічних стінках 1.

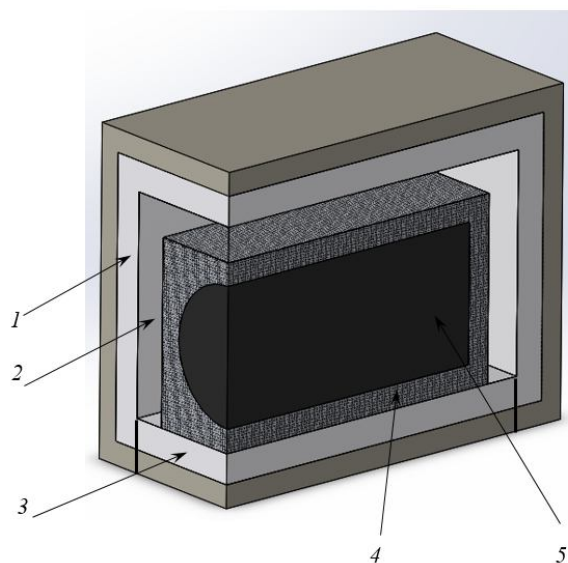


Рис. 3.4. Конструкція електропечі з викочуваним подом на одну заготовку:
1 – бічні стінки і склепіння печі; 2 – газовий робочий простір печі між бічними стінками, склепінням і контейнером; 3 – викочуваний під; 4 – контейнер з вуглецевим сипким матеріалом; 5 – «зелена» заготовка ІГ

Газовий простір печі між бічними стінками, склепінням і контейнером є стисливою рідиною, температура якої може досягати 1300 °С і має властивості поглинального й випромінювального, нерозсіювального середовища. Режим руху газів у газовому просторі печі є турбулентним. Теплообмін в газовому зазорі печі є складним радіаційно-конвективним [107–109], а у твердих конструкціях печі – здійснюється за рахунок теплопровідності.

Під час нагрівання заготовок у печі в інтервалі температур (250–500) °С (залежно від властивостей зв'язуючого, наприклад, СТП або ВТП) відбуваються процеси інтенсивного газовиділення із зв'язуючого. Проходження інтервалу на відносно високих темпах нагрівання заготовок ІГ (більше 1 К/год) може спричинити їхню пористу структуру, тріщиноутворення, надлишкову втрату маси й навіть самоспалахування летких, що в результаті може призвести до деякої неконтрольованості процесу випалювання, відхиленню від заданого температурного регламенту випалу за рахунок можливого додаткового підвищення темпу нагрівання.

Згідно сформульованої фізичної моделі електропечі з викочуванням подом (див. рис. 3.4) математична модель, що описує її стан має бути нестационарною, тепло-гідродинамічною моделлю, в якій враховується турбулентність потоку і складний теплообмін. За основу для побудови такої моделі можуть бути використані осереднені за Reynolds рівняння Navier-Stokes (RANS) в наближенні $k - \varepsilon$ моделі з врахуванням стисливості рідини [110]. Тобто, складність математичної моделі фізичних полів печі визначається наявністю газового простору між бічними стінками, склепінням і контейнером, в якому відбувається складний радіаційно-конвективний теплообмін. Для математичного описання теплообміну решти конструкційних елементів печі достатньо скористатися нестационарним рівнянням теплопровідності [109].

Математичне формулювання задачі тепло-гідродинамічного стану печі на прикладі $k - \varepsilon$ моделі турбулентності Realizable для в'язкого середовища, в якій враховується вплив зміни чисел Reynolds у широкому діапазоні та стисливість рідини [101, 110], має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}}) = 0; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}})}{\partial t} + (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{v}} = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff}; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} k \tilde{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \bar{\rho} \varepsilon - Y_M + S_k; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \varepsilon \tilde{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \bar{\rho} C_1 S_\varepsilon - \bar{\rho} C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{E}) + \nabla \cdot \tilde{\mathbf{v}} (\bar{\rho} \tilde{E} + \bar{p}) = \nabla \cdot \left[\left(\lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \nabla \tilde{T} \right] + \nabla \tilde{\mathbf{v}} : \bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff} - \nabla \cdot \tilde{\mathbf{q}}_r; \\ \bar{p} = \bar{\rho} R \tilde{T}, \end{array} \right. \quad (3.4)$$

де $\bar{\rho}$ – густина, осереднена за Reynolds, кг/м³; t – час, с; ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; $\tilde{\mathbf{v}}$ – вектор швидкості, осереднений за Favre, м/с; \bar{p} – тиск, осереднений за Reynolds, Па; $\bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff} = (\mu + \mu_t) \left[\nabla \tilde{\mathbf{v}} + \tilde{\mathbf{v}} \nabla - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{\mathbf{v}}) \hat{\mathbf{I}} \right] - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \hat{\mathbf{I}}$ – тензор девіаторних напружень, Па; k – турбулентна кінетична енергія, Дж/кг; μ – динамічна в'язкість, Па·с; $\mu_t = \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ – турбулентна в'язкість, Па·с; $C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}}$; $U^* = \sqrt{\hat{\mathbf{S}} : \hat{\mathbf{S}} + \tilde{\boldsymbol{\Omega}} : \tilde{\boldsymbol{\Omega}}}$, с⁻¹; $\hat{\mathbf{S}} = \frac{1}{2} (\nabla \tilde{\mathbf{v}} + \tilde{\mathbf{v}} \nabla)$ – тензор другого рангу швидкості деформації, с⁻¹; $\tilde{\boldsymbol{\Omega}} = \hat{\boldsymbol{\Omega}} - 2 \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} \boldsymbol{\omega}$; $\hat{\boldsymbol{\Omega}} = \bar{\boldsymbol{\Omega}} - \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} \boldsymbol{\omega}$; $\bar{\boldsymbol{\Omega}} = \frac{1}{2} (\nabla \tilde{\mathbf{v}} - \tilde{\mathbf{v}} \nabla)$, с⁻¹; $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \varepsilon_{ijk} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j \mathbf{e}_k$ – тензор 3-го рангу Levi-Civita; $\boldsymbol{\omega} = \omega_k \mathbf{e}_k$ – вектор кутової швидкості, м/с; $A_0 = 4,04$; $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$; $\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W)$; $W = \frac{(\hat{\mathbf{S}} \cdot \hat{\mathbf{S}}) : \hat{\mathbf{S}}}{\tilde{S}^3}$; $\tilde{S} = \sqrt{\hat{\mathbf{S}} : \hat{\mathbf{S}}}$, с⁻¹; $C_1 = \max \left[0, 43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$; $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$; $S = \sqrt{2 \hat{\mathbf{S}} : \hat{\mathbf{S}}}$, с⁻¹; $G_k = \mu_t S^2 -$ джерельний член для k , Вт/м³; $G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \nabla \tilde{T}$ – джерельний член для k , який пов'язаний із виштовхувальною силою, Вт/м³; Pr_t – турбулентне число Prandtl; $\beta = -\frac{1}{\bar{\rho}} \left(\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial T} \right)_p$ – коефіцієнт лінійного температурного розширення, К⁻¹; \tilde{T} – абсолютна температура, осереднена за Favre, К; ε – швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії, Дж/(кг·с); $Y_M = 2 \rho \varepsilon M_t^2$ – джерельний член для k , що враховує стисливість середовища, Вт/м³; $M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$ – турбулентне число Mach; $a = \sqrt{\gamma R T}$ – швидкість звуку, м/с; γ – показник адіабати; R – універсальна газова стала, Дж/(кг·К); $\tilde{E} = \tilde{h} - \frac{\bar{p}}{\bar{\rho}} + \frac{\tilde{\mathbf{v}} \cdot \tilde{\mathbf{v}}}{2}$ – повна масова енергія, осереднена за Favre, Дж/кг; $\tilde{h} = \int_{T_0}^{\tilde{T}} c_p dT$ – масова ентальпія, осереднена за Favre, Дж/кг; c_p – явна масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); $\nabla \cdot \tilde{\mathbf{q}}_r = E(\tilde{T}) = K \left(\int_{\Omega=4\pi} I(s) d\Omega - 4n^2 \sigma \tilde{T}^4 \right)$ – дивергенція густини радіаційного теплового потоку або об'ємна густина радіаційного теплового потоку «сірого» середовища, Вт/м³; K і n – коефіцієнт поглинання (м⁻¹) і показник заломлення, відповідно; Ω – тілесний кут, ср; σ – стала

Стефана–Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $I(\mathbf{s})$ – інтенсивність випромінювання ($\text{Вт} \cdot \text{с}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$) у напрямку \mathbf{s} (м) у тілесному куті $d\Omega$, що визначається із розв’язку рівняння переносу виду $\nabla \cdot [I(\mathbf{s})\mathbf{s}] + KI(\mathbf{s}) = Kn^2 \frac{\sigma \tilde{T}^4}{\pi}$; (\cdot) – оператор подвійного скалярного добутку тензорів.

Коефіцієнти $k - \varepsilon$ – моделі турбулентності (3.4):

$$C_{1\varepsilon} = 1,44; C_2 = 1,9; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,2. \quad (3.5)$$

Для твердих елементів печі система рівнянь (3.4) спрощується до одного нестационарного рівняння енергії (теплопровідності) вигляду

$$\frac{\partial \rho h}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) + q_{elec} + q_{volat}. \quad (3.6)$$

де $q_{elec} = \chi(T) |\nabla U|^2$ – джерело теплоти, що виділяється за рахунок проходження електричного струму крізь нагрівники печі, $\text{Вт}/\text{м}^3$; q_{volat} – теплота утворення летких у заготовках ІГ, $\text{Вт}/\text{м}^3$; χ – коефіцієнт електропровідності матеріалу нагрівника, См ; U – електричний потенціал на нагрівниках, В.

При цьому коефіцієнт теплопровідності пересипки контейнера печі в рівнянні (3.6) приймається ефективною величиною – λ_{eff} , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Початкові умови:

$$\begin{cases} \tilde{T}(X) = T_0; \\ \tilde{\mathbf{v}}(X) = \mathbf{v}_0; \\ \bar{p}(X) = p_0; \\ k(X) = k_0; \\ \varepsilon(X) = \varepsilon_0, \end{cases} \quad (3.7)$$

де $X(x, y, z) \in \Omega$ – декартові координати, м; Ω – розрахункова область.

Граничні умови (див. рис. 3.4):

– на границях контакту напівпрозорого газового простору печі – бічні стінки, склепіння і контейнер задаються умови прилипання для потоку, абсолютного контакту для теплообміну, значення величин кінетичної турбулентної енергії та її дисипації та ступені чорноти внутрішніх поверхонь печі, що утворюють газовий простір

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{v}} = 0; \\ \{\tilde{T}\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \tilde{\mathbf{q}}_\Sigma\} = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla \bar{p} = 0; \\ k = 0; \\ \varepsilon = 0, \end{cases} \quad (3.8)$$

де $\{\tilde{T}\} = \tilde{T}^+ - \tilde{T}^-$; $\{\mathbf{n} \cdot \tilde{\mathbf{q}}_\Sigma\} = \mathbf{n}^+ \cdot \tilde{\mathbf{q}}_\Sigma^+ - \mathbf{n}^- \cdot \tilde{\mathbf{q}}_\Sigma^-$; $\tilde{\mathbf{q}}_\Sigma = \tilde{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{q}}_r$, $\mathbf{q} = -\lambda \nabla T$ – вектор густини теплового потоку, Вт/м²; \mathbf{n} – вектор нормалі до поверхні контакту тіл; \mathbf{q}_r – вектор густини радіаційного теплового потоку, Вт/м²;

– на границях контакту: між непрозорими твердими елементами печі задаються умови абсолютного контакту для теплообміну (3.9), огороження печі – оточуюче середовище – умови конвективного теплообміну (3.10)

$$\begin{cases} \{\tilde{T}\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \tilde{\mathbf{q}}\} = 0, \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = \alpha_{\text{eff}}(T)(T - T_{\text{env}}), \quad (3.10)$$

де $\{\mathbf{n} \cdot \tilde{\mathbf{q}}\} = \mathbf{n}^+ \cdot \tilde{\mathbf{q}}^+ - \mathbf{n}^- \cdot \tilde{\mathbf{q}}^-$; α_{eff} – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_{env} – температура оточуючого середовища, К;

– на площинах симетрії печі задаються адіабатні умови

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda(T) \nabla T) = 0. \quad (3.11)$$

Постановка (3.4)–(3.11) є повним математичним формулюванням задачі для визначення раціональних регламентів випалювання заготовок ІГ в електропечах з викочуванням подом, а також визначає температурне навантаження для дослідження впливу габаритних розмірів заготовок ІГ на їхню міцність у процесі їх термооброблення за допомогою числового аналізу напружено-деформованого стану (2.5)–(2.14).

3.4. Числова модель процесу випалювання заготовок ізостатичного графіту в електропечах з викочуванням подом

Для числової реалізації математичної постановки (3.4)–(3.11) використано вільно відкритий програмний код OpenFOAM [111], який призначений для виконання CFD-розрахунків, що побудований на числовому методі скінченних об'ємів.

Дискретизація геометричної моделі електропечі з викочуванням подом (див. рис. 3.4) виконувалася з використанням тетраедричних елементів та призм в зонах гідродинамічного пограничного шару газового простору печі із застосуванням OpenFOAM. Для генерації та перевірки сітки використовувалися стандартні утиліти OpenFOAM – blockMesh, checkMesh та засоби інтерпретатора мови програмування Python [112]. Параметри розрахункової сітки (кількість елементів, вузлів) визначалися на основі методу подвійного перерахунку [113].

У числових експериментах застосовувалася дискретизація розрахункової області печі, що була отримана підставі виконання подвійних перерахунків, яка включає 809998 розрахункових комірок і 183945 вузлів (рис. 3.5).

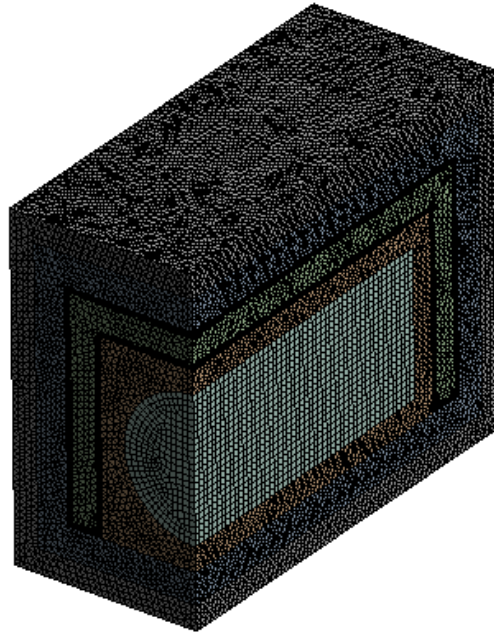


Рис. 3.5. Дискретизація числової моделі тепло-гідродинамічного стану електропечі з викочуваним подом під час випалювання заготовок ІГ: $N_{\text{nod}}=183945$ – кількість вузлів; $N_{\text{cell}}=809998$ – кількість елементів (розрахункових комірок)

Теплофізичні властивості матеріалів числової моделі електропечі (див. рис. 3.5) наведено в табл. 3.1, 3.4. Початковими та граничними умовами під час виконання розрахунків слугували (3.7)–(3.11): $T_0=293$ К; $\mathbf{v}_0=(0; 0; 0)$ м/с; $p_0=1$ бар; $k_0=0$ Дж/кг; $\varepsilon_0=0$ Дж/(кг·с); $\alpha_{\text{eff}}=(8-15)$ Вт/(м²·К); $T_{\text{env.}}=293$ К; ступінь чорноти внутрішніх поверхонь печі, що утворюють газовий простір 0,6; 0,8.

Таблиця 3.4. Теплофізичні властивості матеріалів числової моделі електропечі з викочуваним подом

Матеріал	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	n	K , м ⁻¹	$\mu \cdot 10^{-6}$, 10 ⁻⁶ , Па·с	$K_{\text{ТР}} \cdot 10^{-3}$, К ⁻¹
Газовий простір	1,226	1047	$2,45 \cdot 10^{-2}$	1,0003	2,5	16,65	3,67
Вогнетрив	1900	675	0,84	–	–	–	–
Теплоізолятор	500	1047	0,09	–	–	–	–
Вуглецевий сипкий матеріал	600	1050	0,75	–	–	–	–

Розроблена числова модель фізичних полів потрібна для визначення:

- 1) раціональних регламентів випалювання заготовок ІГ за різних габаритних розмірів та різного гранулометричного та матеріального складу;
- 2) за наперед заданим темпом нагрівання заготовок у печі визначати різницю електричного потенціалу на нагрівниках, максимальні перепади температур у радіальному та осьовому напрямках та відповідні компоненти градієнта температури.

3.5. Верифікація числової моделі

З метою перевірки адекватності розробленої математичної моделі фізичних полів електропечі з викочуваним подом, призначеної для випалювання заготовок ІГ, (див. п. 3.3) проведена її верифікація на даних точного аналітичного розв'язку (3.2), (3.3), (див. табл. 3.2).

Для виконання такого порівняння за допомогою варіювання падінням напруги на нагрівниках печі відпрацьовувався допустимий темп нагрівання заготовок ІГ діаметром 600 мм $V_{t \max}$ (див. табл. 3.2) залежно від рівня температури у контейнері печі. Після чого для кожного рівня температур від 100 °С до 900 °С визначався максимальний радіальний перепад в поперечному осьовому перерізі заготовки Δt_{\max} , який потім порівнювався з відповідним перепадом температур, розрахованим за (3.2) (див. табл. 3.2). Результати цього порівняння наведено на рис. 3.6.

Результати порівняння даних числового аналізу з аналітичним розв'язком показують, що похибка визначення гранично допустимих перепадів температур заготовок, які не призводять до виникнення тріщин та сколів під час випалювання, не перевищує 5–10 % залежно від рівня температури обробки, що є абсолютно прийнятним для виконання інженерних розрахунків.

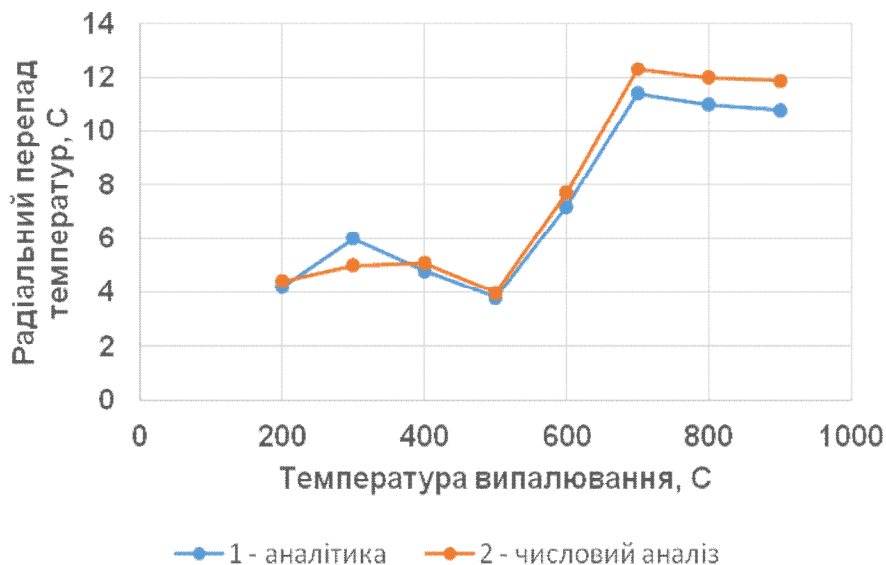


Рис. 3.6. Результати порівняння даних числового аналізу з аналітичним розв'язком під час випалювання заготовок ІГ діаметром 600 мм

3.6. Висновки до розділу 3

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1) З використанням точних аналітичних розв'язків і числового моделювання НДС під дією температурного навантаження визначено гранично допустимі режими випалювання заготовок ізостатичного графіту та отримано максимальні значення перепадів та градієнтів температур залежно від температури випалу. Встановлено, що для «зелених» заготовок ІГ на інтервалі температур випалювання до 900 °С гранично допустимі значення градієнта

температури складають (10–36) К/м з мінімумом за температури 500 °С, а темп зростання температури не повинен перевищувати (0,3–1,9) К/год (середнє значення 1 К/год), що визначає тривалість процесу випалювання близько (800–900) год.

2) На підставі проведених досліджень НДС заготовок ІГ виконано підбір пічного обладнання – електропіч з викочуванням подом, яка забезпечує такі температурні умови процесу термооброблення високоусадкових графітових матеріалів, що мінімізують ймовірність утворення тріщин та сколів останніх.

3) Розроблено фізичну, математичну та числові моделі процесу випалювання заготовок ІГ в електропечах з викочуванням подом, що дає змогу: визначати раціональні регламенти випалювання заготовок ІГ за різних габаритних розмірів та різного гранулометричного та матеріального складу; за наперед заданим темпом нагрівання заготовок у печі визначати максимальні (гранично допустимі) перепади температур в радіальному та осьовому напрямках заготовок та відповідні компоненти градієнта температури.

4) Виконано верифікацію розробленої числової моделі тепло-гідродинамічного стану печі з викочуванням подом на даних аналітичних розв'язків. Встановлено, що похибка визначення гранично допустимих перепадів температур заготовок, які не призводять до виникнення тріщин та сколів під час випалювання, не перевищує (5–10) % залежно від рівня температури обробки, що є абсолютно прийнятним для виконання інженерних розрахунків.

4. ФІЗИЧНА, МАТЕМАТИЧНА ТА ЧИСЛОВА МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДІЛУ ГРАФІТУВАННЯ ЗАГОТОВОК ІЗОСТАТИЧНОГО ГРАФІТУ

4.1. Вибір пічного обладнання для графітування заготовок ізостатичного графіту

Наразі у світі для графітування заготовок штучного графіту (див. розд. 1) застосовуються електропечі опору двох типів: Ачесона з непрямым нагріванням заготовок і Кастнера з прямим нагріванням заготовок за рахунок пропускання електричного струму крізь них. Перевагами технології Кастнера є: менші на (20–25) % питомі витрати енергії (ПВЕ) порівняно з технологією Ачесона, а тривалість процесу – більш ніж утричі, при цьому якість зграфітованих заготовок вища завдяки більш рівномірному полю температур.

До недоліків печей Кастнера можна віднести більш високі вимоги до технологічного регламенту та високу вартість обладнання.

Оскільки печі Кастнера порівняно з печами Ачесона є більш енергоефективними та забезпечують більш рівномірне поле температур у виробках під час термообробки, то для графітування заготовок ІГ обираємо печі прямого нагрівання Кастнера.

4.2. Фізична модель печі прямого нагрівання

Перед формулюванням математичної моделі теплоелектричного стану печі прямого нагрівання під час графітування спочатку сформулюємо її фізичну модель.

Робочий простір печі Кастнера (рис. 4.1) представляє собою витягнутий паралелепіпед з відкритим верхом, у центральній частині якого горизонтально укладені свічки (колони) із заготовок ІГ, які вкриті теплоізоляційним сипким вуглецевим матеріалом. Зазори між гранулами теплоізоляційного матеріалу заповнені димовими газами.

Піч за допомогою графітових струмопідводів, які розташовані на торцях печі, підключаються до джерела постійного електричного струму. Нагрівання електродних заготовок здійснюється за рахунок джоулевої теплоти та екзотермічних хімічних реакцій. Теплота, що виділяється в печі, також витрачається на нагрівання огорожувальних елементів, ендотермічні хімічні реакції і втрати в оточуюче середовище. У процесі нагрівання печі відбувається інтенсивне випаровування вологи, що призводить до стрибкоподібної зміни фізичних властивостей теплоізоляційного сипкого матеріалу.

Випаровування вологи в процесі розігріву печі починається в центральній її частині на периферії заготовок ІГ у місцях їх контакту із сипкою вуглецевою теплоізоляцією. Утворювана пара розширяється і спричинює переміщення незв'язаної вологи, яка випарувалася, в периферійні холодні шари теплоізоляції, де також відбувається її конденсація. Подальше випаровування вологи супроводжується витисканням вологи до стінок і поду печі,

конденсацією водяної пари в менш нагрітих шарах теплоізоляційної шихти і частково її евакуації в оточуюче середовище.

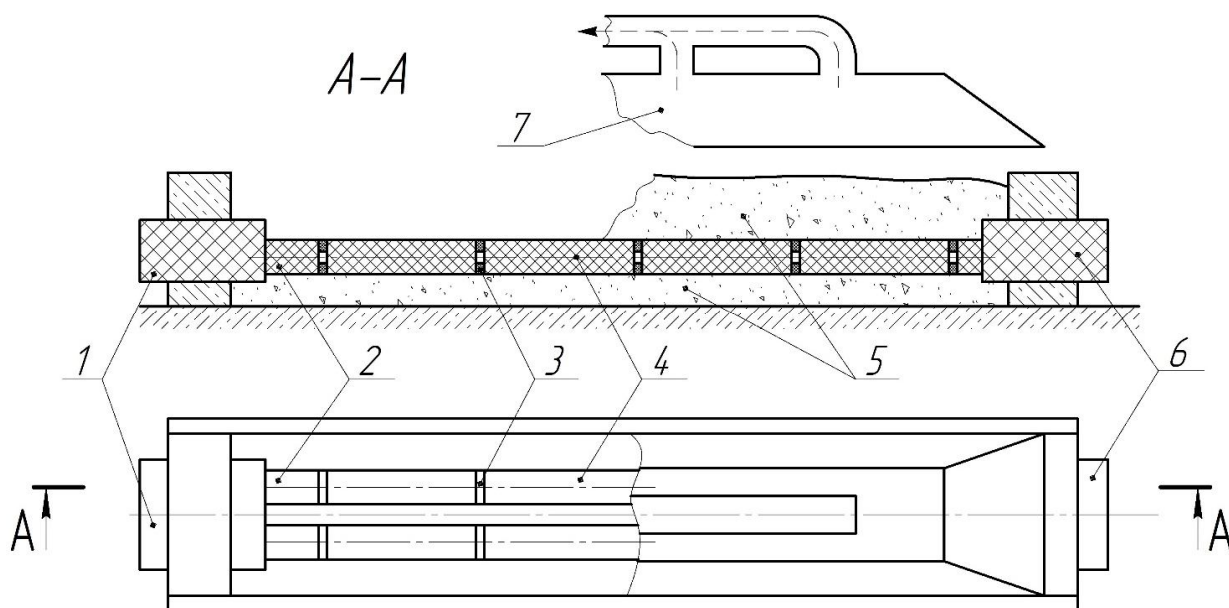
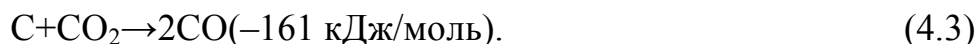
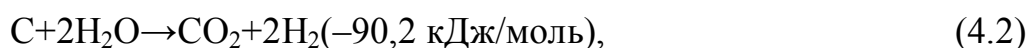
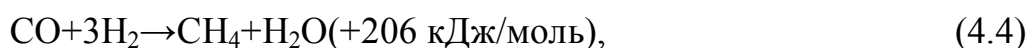


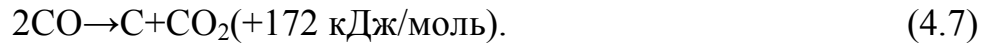
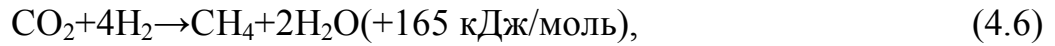
Рис. 4.1. Схема печі графітування Кастнера: 1, 6 – передній і тильний струмопідводи, відповідно; 2 – компенсаційні вставки; 3 – кільцеподібні електроконтактні прокладки; 4 – електродні заготовки; 5 – теплоізоляційна шихта; 7 – укриття для відведення газів

Сконденсована в теплоізоляційній шихті вода під дією гравітаційних сил опускається, що збільшує концентрацію вологи в подовій теплоізоляції. Утворена пара під час випаровування вологи в подовій і бічній теплоізоляції майже в повному об'ємі проходить крізь нагріту центральну частину печі. Внаслідок цього за високих температур (вище за 650 °С) відбувається конверсія водяної пари, яка супроводжується газифікацією вуглецевого матеріалу здебільшого в зонах контакту заготовок ІГ з сипкою теплоізоляційною шихтою зі значним поглинанням теплоти за такими основними реакціями [114, 115] (за температури ~800 °С):



Продукти реакцій газифікації – оксид вуглецю і водень – частково евакууються в оточуюче середовище і частково, проходячи крізь менш нагріті шари теплоізоляції, вступають в екзотермічні реакції з утворенням води і метану за такими основними реакціями [116, 117] (за температури теплоізоляції ~200 °С):





Вода, що утворилася в результаті конверсії оксиду вуглецю і водню, конденсується і під дією гравітаційних сил опускається в подову теплоізоляцію, де знову випаровується. Таким чином, завдяки механізму переміщення вологи й пари та механізму газифікації вуглецевого матеріалу, відбувається циркуляція води й пари в об'ємі печі до повної її евакуації в оточуюче середовище.

З рівнянь хімічних реакцій (4.1)–(4.7) видно, що більшість з них можуть бути як прямими, так і зворотними. Напрям вказаних реакцій залежить від температури й визначається константами рівноваги [116, 117].

За температури вищої за 3200 К відбувається сублімація вуглецевмісних матеріалів печі. Між елементами конструкції печі також відбувається теплоелектрична контактна взаємодія.

4.3. Математична модель процесу графітування заготовок

Математична модель теплоелектричного стану печі Кастнера базується на фізичній моделі процесу графітування [118] (п. 4.2).

Відмінною особливістю розробленої математичної моделі від моделі, наведеної в працях [119, 120], є врахування механізмів перенесення вологи й пари, перенесення теплоти за рахунок реакцій газифікації вуглецевого матеріалу та конверсії оксиду вуглецю і водню в теплоізоляційній шихті.

Система нелінійних диференціальних рівнянь, що описує теплоелектричні поля печі Кастнера, може бути записана в такій узагальненій постановці:

$$\begin{cases} \frac{\partial H(X)}{\partial \tau} = \nabla \cdot [\lambda_{\text{eff}}(p, T) \nabla T(X)] + \chi(p, T) \|\nabla U(X)\|^2 + q_{\text{v chem}} + q_{\text{v devapor}}; \\ \nabla \cdot [\chi(p, T) \nabla U(X)] = 0, \end{cases} \quad (4.8)$$

де $H = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p^{\text{eff}}(T) \rho(T) dT$ – повна об'ємна ентальпія, що враховує теплоту випаровування або конденсацію вологи, або теплоту сублімації вуглецевмісних матеріалів печі, Дж/м³; τ – час, с;

$$c_p^{\text{eff}}(T) = \begin{cases} c_{p-0}^*(T), & T < T_{\text{eqL}}; \\ \frac{c_{p-0}^*(T_{\text{eqL}}) + c_{p+0}(T_{\text{eqR}})}{2} + \frac{L_{\text{fm}}}{\Delta T}, & T_{\text{eqL}} \leq T \leq T_{\text{eqR}}; \\ c_{p+0}(T), & T > T_{\text{eqR}}, \end{cases} \quad (4.9)$$

– ефективна масова ізобарна теплоємність, що враховує теплоємність води та теплоту її випаровування в матеріалах з вмістом вологи, а в графітових матеріалах – теплоту сублімації графіту за високих температур, Дж/(кг·К); $T_{\text{eqL}} = T_{\text{eq}} - \Delta T/2$; $T_{\text{eqR}} = T_{\text{eq}} + \Delta T/2$; T_{eq} – рівноважна температура випаровування, або сублімації (фазового переходу першого роду) або хімічної реакції, К; ΔT – температурний інтервал згладжування [120], К; c_{p-0}^* – масова теплоємність матеріалу з урахуванням вмісту вологи в ньому, Дж/(кг·К); $L_{fm} = \begin{cases} \alpha_g L_{fg} - \text{при випаровуванні вологи;} \\ (1 - \alpha_g) L_{fc} - \text{при сублімації графіту;} \end{cases}$ – масова теплота за фазових переходів першого роду, Дж/кг; α_g – масова частка води у вологому матеріалі; L_{fg} , L_{fc} – масова теплота фазового переходу під час випаровування води та сублімації графіту, відповідно, Дж/кг; ρ – густина матеріалу, кг/м³; ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; $q_{v \text{ chem}}$ – густина внутрішнього джерела теплоти, що пов'язана з хімічними реакціями (4.1)–(4.7) [116, 117], Вт/м³; $X(x, y, z) \in R^3$ – декартова система координат, м; $q_{v \text{ de vapor}}$ – густина внутрішнього джерела теплоти, що враховує тепломасоперенесення водяної пари та її конденсацію, Вт/м³.

Об'ємна ентальпія, в якій враховується вологовміст теплоізоляції і теплота сублімації вуглецевмісних матеріалів печі Кастнера з використанням залежності для $c_p^{\text{eff}}(T)$, визначається співвідношенням

$$H = \int_0^{T_{\text{eqL}}} c_{p-0}^*(T) \rho_{-0}^*(T) dT + \frac{[c_{p-0}^*(T_{\text{eqL}}) \rho_{-0}^*(T_{\text{eqL}}) + c_{p+0}(T_{\text{eqR}}) \rho_{+0}(T_{\text{eqR}})]}{2} \Delta T + \\ + L_{fv} + \int_{T_{\text{eqR}}}^{T > T_{\text{eqR}}} c_{p+0}(T) \rho_{+0}(T) dT, \quad (4.10)$$

де c_{p-0}^* , ρ_{-0}^* і c_{p+0} , ρ_{+0} – властивості матеріалів по обидва боки від температури фазового переходу (з урахуванням вмісту вологи в них), відповідно; $L_{fv} = \begin{cases} \alpha_g \rho_g L_{fg} - \text{при випаровуванні вологи;} \\ (1 - \alpha_g) \rho_c L_{fc} - \text{при сублімації графіту;} \end{cases}$ – об'ємна теплота фазового переходу першого роду, Дж/м³; ρ_g , ρ_c – густина води та графіту, відповідно, кг/м³.

Коефіцієнт ефективної теплопровідності матеріалів із врахуванням вологовмісту визначається залежністю

$$\lambda_{\text{eff}}(p, T) = \begin{cases} \lambda_{-0}(p, T), & T < T_{\text{eqL}}; \\ \lambda_{-0}(p, T_{\text{eqL}}) + \frac{\lambda_{+0}(p, T_{\text{eqR}}) - \lambda_{-0}(p, T_{\text{eqL}})}{\Delta T} T, & T_{\text{eqL}} \leq T \leq T_{\text{eqR}}; \\ \lambda_{+0}(p, T), & T > T_{\text{eqR}}, \end{cases} \quad (4.11)$$

де λ_{-0} і λ_{+0} – теплопровідність матеріалу по обидва боки від температури фазового переходу, відповідно, Вт/(м·К); p – тиск, Па.

Густина внутрішнього джерела теплоти, пов'язана з хімічними реакціями газифікації вуглецевого матеріалу, описується співвідношенням

$$q_{V\text{chem}} = \frac{Q_{r.g} m_{\text{vapor}}}{V_{\text{gasific}} \tau_{\text{gasific}}}, \quad (4.12)$$

де $Q_{r.g}$ – тепловий ефект від хімічних реакцій газифікації, Дж/кг; m_{vapor} – маса водяної пари, яка вступила в реакцію газифікації, кг; V_{gasific} – об'єм зони газифікації вуглецевмісного матеріалу, м³; τ_{gasific} – тривалість процесу газифікації, с.

За умови, що основною реакцією процесу газифікації є реакція «водяного газу» (4.1), величина $Q_{r.g}$ визначається за (4.13) [116], а m_{vapor} – за (4.14):

$$Q_{r.g} = (-7165100 - 718,25T + 0,1162T^2 + 0,00007903T^3), \quad (4.13)$$

$$m_{\text{vapor}} = 1,5m_C = 1,5 \min \left(ke^{\frac{E}{RT}} m_{C\text{gasif}} \tau_{\text{gasific}}, 0,6667m_{\text{all.vapor}} \right), \quad (4.14)$$

де T – абсолютна середньомасова температура вуглецю в зоні газифікації, К; m_C – маса вуглецю, що вступив у реакцію газифікації [117], кг; k – передекспоненціальний множник, с⁻¹; E – енергія активації, Дж/моль; R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К); $m_{C\text{gasif}}$ – маса вуглецю в зоні газифікації, кг; $m_{\text{all.vapor}}$ – маса водяної пари, що пройшла крізь зону газифікації, кг.

Густина внутрішнього джерела теплоти, пов'язаного з масопереносом водної пари та її конденсації, визначається залежністю

$$q_{V\text{devapor}} = \frac{m_{\text{vapor}} L_{f8} \xi_{\text{evac.g}}}{V_{\text{cond}} \tau_{\text{cond}}}, \quad (4.15)$$

де m_{vapor} – маса випаруваної вологи, кг; $\xi_{\text{evac.g}}$ – коефіцієнт, що враховує випаровування водяної пари в навколишнє середовище; V_{cond} – об'єм зони конденсації водяної пари, м³; τ_{cond} – тривалість процесу конденсації, с.

Початкові умови для (4.8):

$$\begin{cases} T = 293; \\ U = 0, \end{cases} \quad (4.16)$$

де U – електричний потенціал, В.

Граничні умови для (4.8) для $\tau > 0$:

– на торцях струмопідводів печі

$$j_n(\tau)|_{\text{shunt}} = \mathbf{n} \cdot (-\chi(p, T) \nabla U) \vee U|_{\text{shunt}} = U(\tau), \quad (4.17)$$

де j_n – нормальна густина електричного струму, А/м²; \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до поверхні струмопідводу; χ – коефіцієнт електропровідності, См;

– на зовнішніх поверхнях печі, що межують з навколишнім середовищем

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot [-\lambda(p, T) \nabla T] = \alpha_{\text{eff}}(T)(T - T_{\text{env}}); \\ \mathbf{n} \cdot \nabla U = 0, \end{cases} \quad (4.18)$$

де α_{eff} – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_{env} – абсолютна температура навколишнього середовища, К;

– на осях симетрії печі

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla U|_{\text{axis} \parallel \mathbf{j}} = 0 \wedge U|_{\text{axis} \perp \mathbf{j}} = 0, \end{cases} \quad (4.19)$$

де \mathbf{j} – вектор густини електричного струму, А/м²;

– умови теплоелектричного контакту між елементами конструкції печі

$$\begin{cases} \{T\} = \mathbf{n} \cdot (r_\lambda \mathbf{q}); \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0; \\ \{U\} = \mathbf{n} \cdot (r_e \mathbf{j}); \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}\} = 0, \end{cases} \quad (4.20)$$

де r_λ – контактний термічний опір, (м²·К)/Вт; \mathbf{q} – вектор густини теплового потоку, Вт/м²; r_e – контактний електричний опір, Ом·м²; \mathbf{j} – вектор густини електричного струму, А/м².

Система рівнянь (4.8)–(4.20) є повним математичним формулюванням задачі теплоелектричного стану печі графітування Кастнера.

4.4. Методика числового розв'язання теплоелектричної задачі

Головним джерелом нагрівання печі Кастнера є джоулева теплота, що виділяється за рахунок проходження електричного струму крізь вуглецевмісні заготовки. Другим за значенням джерелом теплоти є теплота хімічних реакцій конверсії водяної пари і оксиду вуглецю та водню в сипкій теплоізоляції. Згідно з (4.8), величина джоулевої теплоти залежить від квадрата вектора напруженості електричного поля ($E = -\nabla U$, В/м) і коефіцієнта електропровідності матеріалів, який у свою чергу залежить від температури й тиску. З експериментальних даних за двохпараметричною залежністю коефіцієнта електропровідності $\chi(p, T)$ вуглецевих матеріалів [121, 122] випливає, що в межах зміни температури й тиску в сипких вуглецевих матеріалах печі Кастнера залежність коефіцієнта електропровідності від зміни температури набагато сильніша, ніж від тиску. Для визначення залежності коефіцієнта електропровідності тиску в сипкому шарі тиск приймається як гідростатичний.

Для числового розв'язання нелінійної задачі (4.8)–(4.20) використовується метод МСЕ. Поставлена задача розв'язується ітераційно з використанням лінеаризації за методом Ньютона [122] (див. додаток В).

Дискретизація розрахункової області здійснюється лінійними тетраедрами й шестигранними елементами з використанням вільного відкритого програмного забезпечення для автоматизованої генерації сітки Gmsh [123]. Для розв'язання теплоелектричної задачі використовувалося програмне забезпечення авторської розробки [122], що пройшло тестування на точних аналітичних і числових розв'язках (див. додаток В).

4.5. Числова модель фізичних полів під час графітування заготовок

Розрахункова область для розробки числової моделі печі Кастнера представляє собою четверту частину печі (рис. 4.2,а). Для дискретизації розрахункової області використано програмне забезпечення Gmsh [123]. При цьому параметри розрахункової сітки (кількість скінченних елементів, вузлів) визначалися на основі методу подвійного перерахунку [113]. Для проведення числових експериментів на підставі виконання подвійних перерахунків була прийнята наступна дискретизація розрахункової області: 150153 СЕ і 72599 вузлів (рис. 4.2,б).

Розроблена числова модель печі Кастнера призначена для визначення за допомогою виконання числових експериментів таких фізичних полів і параметрів: поля електричного потенціалу, графіків зміни електричної потужності, електричного потенціалу та сили струму залежно від часу; поля температури, швидкості зміни температури, перепаду та абсолютних значень температур у заготовках ІГ, теплоізоляції, та конструктивних елементах печі; теплових втрат у навколишнє середовище; ступеня графітування заготовок, коефіцієнта корисної дії (ККД) і ПВЕ печі.

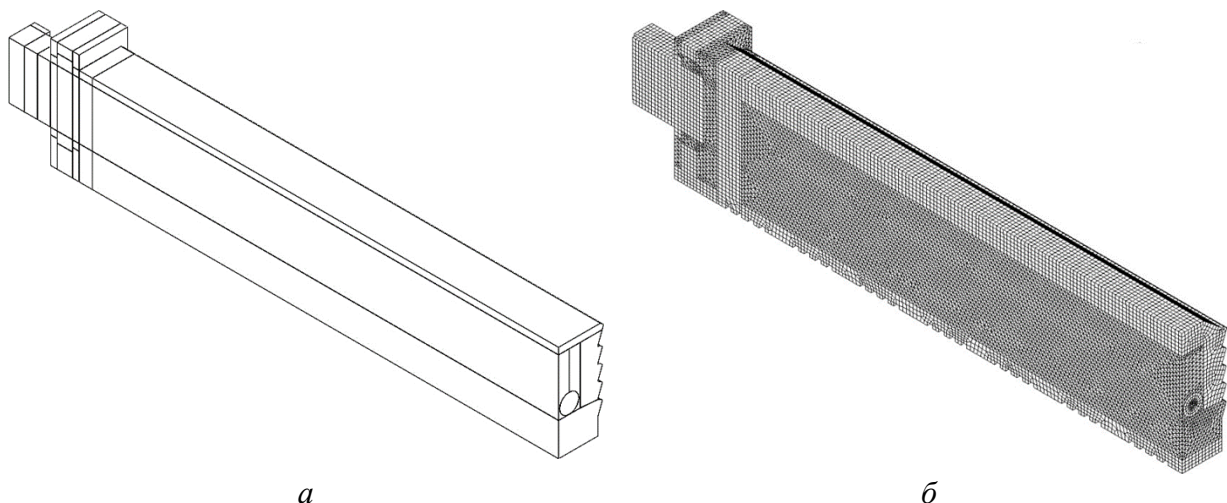


Рис. 4.2. Геометрична модель (а) та скінченно-елементна дискретизація (б) числової моделі печі графітування Кастнера

4.6. Верифікація числової моделі

Порівняльний аналіз результатів числового моделювання й фізичного експерименту з визначення температурних полів у печі Кастнера [124] проводився порівнянням середніх значень температур, визначених за трьома точками на периферії електродних заготовок у різних їх перерізах (рис. 4.3–4.5). За даними фізичного експерименту відносне відхилення значень температури в кожному з розглянутих перерізів заготовок складає близько 3 % від їхнього середнього значення, а для числового експерименту – не більше 1 %.

Обмеження верхньої границі температур, що зіставляються, (1600 °C) на графіках (див. рис. 4.3–4.5) пов'язано з вимірювальними характеристиками датчиків температури, які застосовувалися у фізичному експерименті на печі Кастнера [124].

Залежність зміни середнього значення температури від ПВЕ в поперечному перерізі центральної заготовки правої свічки для середньої її частини показана на рис. 4.3, а для торцевої її частини – на рис. 4.4.

Залежність середніх значень росту температури від ПВЕ в поперечному перерізі торцевої частини крайньої заготовки лівої свічки наведено на рис. 4.5.

У результаті зіставлення даних числового аналізу з експериментом (див. рис. 4.3–4.5) встановлено, що різниця між розрахунковими та експериментальними даними не перевищує 4 % в інтервалі температур до 1600 °C для варіанта розрахунків з врахуванням впливу теплових ефектів хімічних реакцій газифікації. В іншому разі, коли відсутній вплив теплових ефектів хімічних реакцій газифікації в числовій моделі печі, відмінність від експериментальних даних становить більше 10 %.

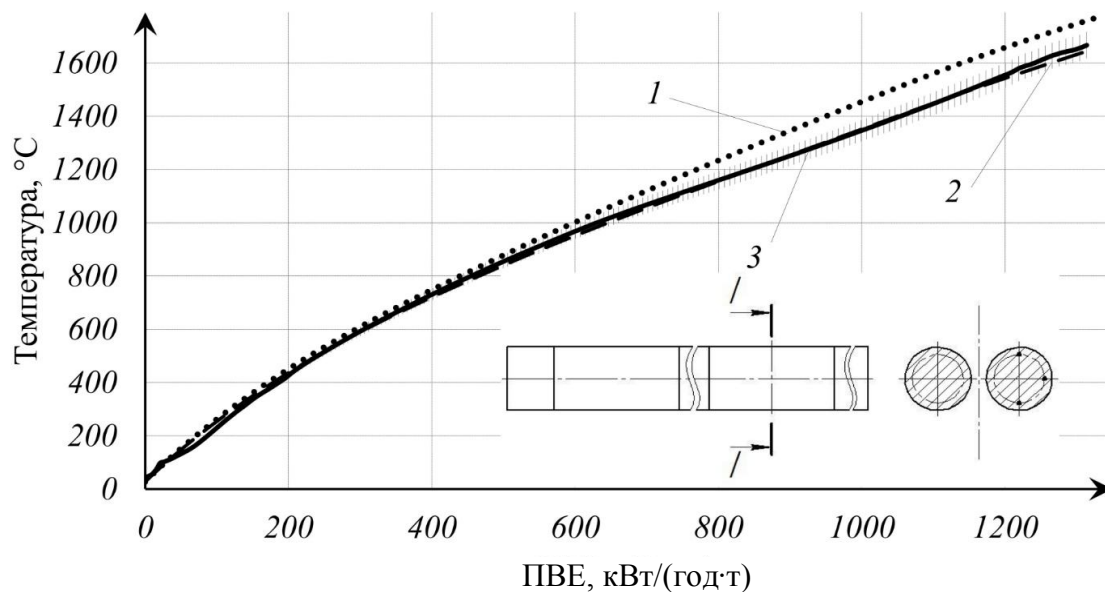


Рис. 4.3. Зміна середнього значення температури в поперечному перерізі середньої частини центральної заготовки правої свічки залежно від ПВЕ: 1 – числове моделювання без врахування теплових ефектів хімічних реакцій газифікації; 2 – моделювання з врахуванням теплових ефектів хімічних реакцій газифікації; 3 – експеримент ($\delta_t=3\%$)

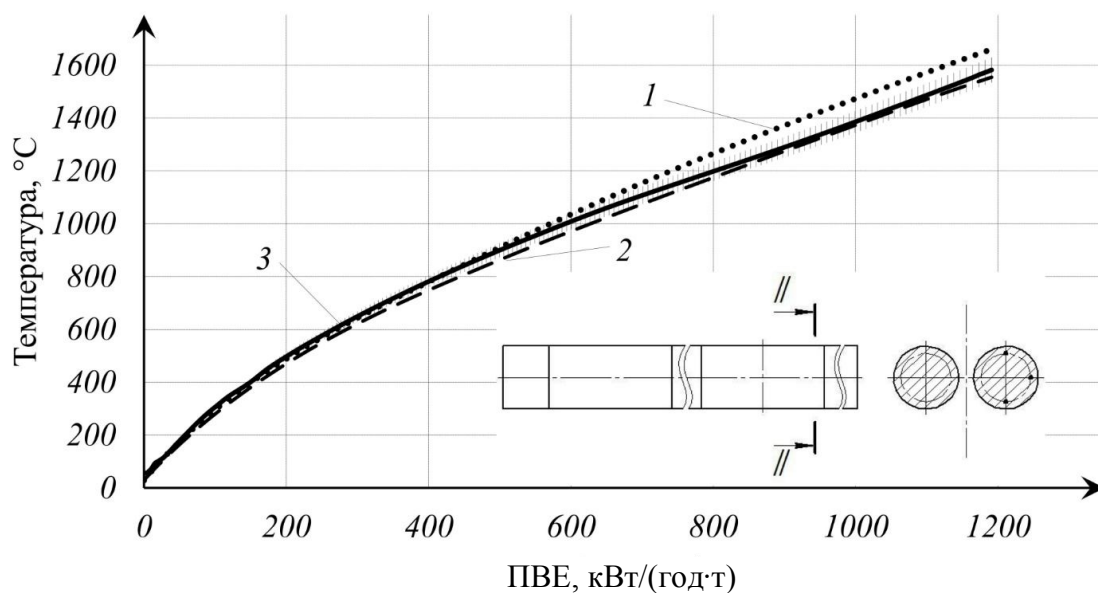


Рис. 4.4. Зміна середнього значення температури в поперечному перерізі торцевої частини центральної заготовки правої свічки залежно від ПВЕ: 1 – числове моделювання без врахування теплових ефектів хімічних реакцій газифікації; 2 – числове моделювання із врахуванням теплових ефектів хімічних реакцій газифікації; 3 – експеримент ($\delta_t=3\%$)

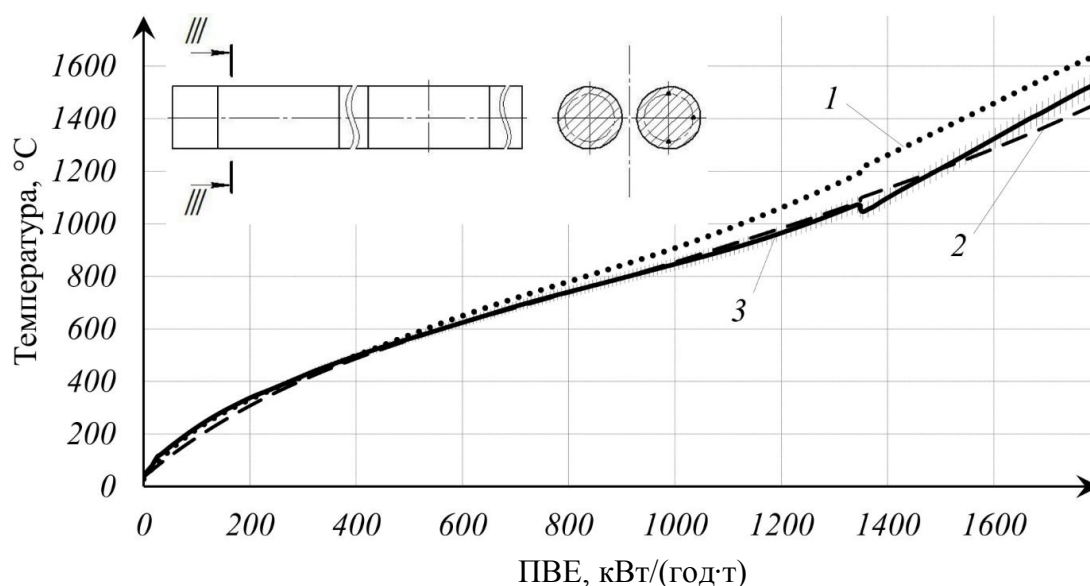


Рис. 4.5. Зміна середнього значення температури в поперечному перерізі торцевої частини крайньої заготовки правої свічки залежно від ПВЕ: 1 – числове моделювання без врахування теплових ефектів хімічних реакцій газифікації; 2 – числове моделювання із врахуванням теплових ефектів хімічних реакцій газифікації; 3 – експеримент ($\delta_t=3\%$)

4.7. Висновки до розділу 4

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1) Здійснено вибір пічного обладнання для графітування заготовок ізостатичного графіту. Встановлено, що застосування печей прямого нагрівання Кастнера для графітування заготовок ІГ є доцільним, оскільки печі Кастнера порівняно з печами Ачесона є більш енергоефективними та забезпечують більш рівномірне поле температур у виробках під час термообробки.

2) На підставі аналізу фізико-хімічних процесів, що проходять під час графітування продукції ІГ у печах Кастнера, сформульовано теплоелектричну фізичну модель печі, в якій враховуються теплові ефекти хімічних реакцій, випаровування й конденсації води, сублімації графіту, теплоелектрична контактна взаємодія між елементами конструкції печі.

3) Сформульовано математичну модель теплоелектричного стану печі Кастнера в процесі графітування заготовок ІГ, у якій враховуються теплові ефекти реакцій газифікації вуглецевмісного матеріалу, конверсія оксиду вуглецю і водню в теплоізоляційному сипкому матеріалі й тепломасоперенос води, сублімація графіту, контактна взаємодія між елементами конструкції теплоелектричної природи. На базі запропонованої математичної моделі розроблено відповідну числову модель теплоелектричного стану печі Кастнера з використанням програмного забезпечення авторської розробки, побудованого на числовому методі скінченних елементів.

4) Верифікація числової моделі теплоелектричного стану печі Кастнера довела узгодження результатів числового моделювання температурних полів з фізичним експериментом в межах 4 % в інтервалі зміни температур до 1600 °C у разі врахування впливу теплових ефектів хімічних реакцій газифікації. В

іншому разі, тобто без врахування теплових ефектів газифікації, розбіжність між числовими та експериментальними даними становить більше 10 %.

5) Виконані дослідження необхідні для розробки енергозберігаючих регламентів введення електричної потужності на діючих печах Кастнера, під час модернізації їх конструкцій для перевірки експлуатаційної придатності або в разі переходу на графітування нової продукції, наприклад, заготовок П.

5. ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕГЛАМЕНТІВ ОБЛАДНАННЯ ПІД ЧАС ВИПАЛЮВАННЯ ТА ГРАФІТУВАННЯ ЗАГОТОВОК ІЗОСТАТИЧНОГО ГРАФІТУ

5.1. Вплив габаритних розмірів заготовок на технологічні регламенти їх випалювання

Значення гранично допустимої різниці температури Δt_{\max} у радіальному напрямку заготовки ІГ діаметром 300 мм та максимально допустимої швидкості нагрівання заготовок $V_{t \max}$ під час їх випалювання розраховані за формулами (3.2), (3.3) з використанням даних табл. 3.1 наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Гранично допустимі значення радіальної різниці температур/градієнта температури і темпу підйому температури під час випалювання заготовок ІГ Ø300 мм (прожарений кокс (15 мкм)+40 % ВТП)

$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\max}, ^\circ\text{C/grad } t, \text{ К/м}$	$V_{t \max}, \text{ К/год}$
200	4,2/28	1,28
300	6,0/40	2,24
400	4,8/32	1,98
500	3,8/26	1,82
600	7,2/48	3,88
700	11,4/76	6,56
800	11,0/73	7,09
900	10,8/72	7,47

Примітка: У розрахунках не враховано вплив інтервалу температур з інтенсивним газовиділенням летких із заготовок ІГ.

З порівняння даних табл. 3.2 і 5.1 випливає, що зменшення діаметра заготовок ІГ удвічі не впливає на максимально допустимі радіальні перепади температур, оскільки у формулі (3.2) величина Δt_{\max} не залежить від радіуса/діаметра заготовки. Однак при цьому максимально допустимі радіальні градієнти температур збільшуються удвічі, а темп підйому температури – у чотири рази, оскільки у формулі (3.3) величина $V_{t \max}$ залежить від радіуса заготовки у другому степені й тому тривалість процесу випалювання можна скоротити з 800 год до 200 год.

Результати порівняння допустимо можливих темпів нагрівання заготовок ІГ (за яких не відбувається тріщиноутворення в заготовках) залежно від рівня температури обробки заготовок ІГ (регламент випалювання) для різних діаметрів заготовок наведено на рис. 5.1.

З аналізу графіків (див. рис. 5.1) видно, що габаритні розміри заготовок ІГ однозначно впливають на регламент їх випалювання, що проявляється на зміні темпу нагрівання заготовок та відповідно на тривалості процесу випалу. Тобто, зі збільшенням габаритних розмірів заготовок ІГ темп їх нагрівання зменшується, що відповідно призводить до збільшення тривалості процесу випалювання.

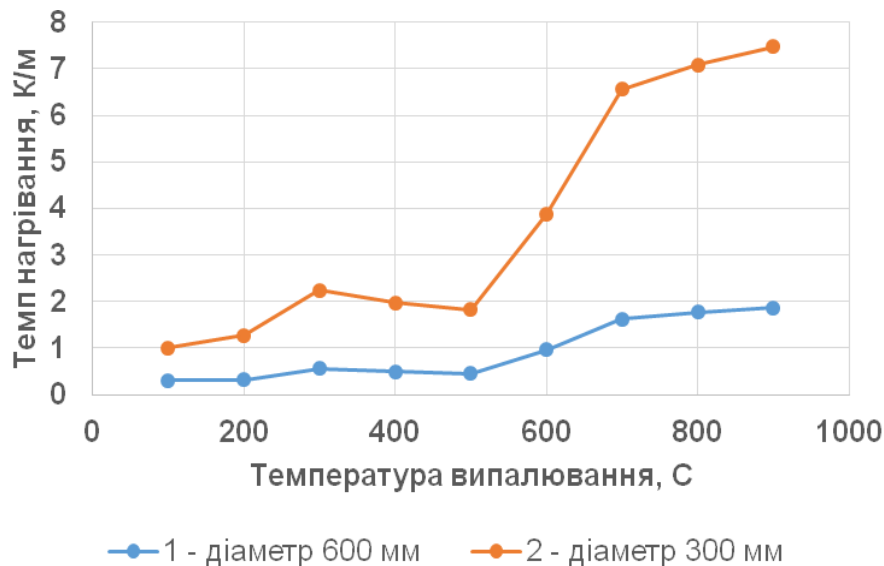


Рис. 5.1. Порівняння регламентів випалювання заготовок ІГ різних діаметрів

5.2. Дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів на процес прямого графітування заготовок у печах Кастнера

Метою дослідження було визначити та запропонувати прості та ефективні методи з модернізації сучасної технології прямого графітування для підвищення її енергоефективності та впровадження на вітчизняних підприємствах [125].

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання:

- виконати числові дослідження теплового стану печі Кастнера за різних конструктивно-технологічних параметрів;
- провести зіставлення отриманих результатів з температурних полів впродовж кампанії графітування за різних варіантів формування електродних свічок;
- визначити можливі напрямки удосконалення конструкції печей прямого нагріву.

Числові дослідження проводилися з використанням верифікованої числової моделі теплоелектричного стану печі Кастнера, описаної у праці [118].

Нижче наведено результати числових експериментів з визначення впливу розмірів електроконтактних прокладок і контактного електричного опору (КЕО) між електродними заготовками у свічках на тепловий стан печі Кастнера.

Числові дослідження з визначення впливу розміру діаметра внутрішнього отвору електроконтактної прокладки на розподіл температурних полів у заготовках проводилися для схеми завантаження печі графітування у дві свічки. Діаметр електродних заготовок і зовнішній діаметр прокладок становив 435 мм. Розмір внутрішнього діаметра прокладок мав значення 120; 220 і 320 мм. Критерієм закінчення процесу графітування слугувало досягнення значення питомих витрат електроенергії 3700 кВт·год/т. У результаті процес підведення електричної енергії до печі складав близько 12 год.

У результаті аналізу отриманих числових даних з'ясовано, що завдяки збільшенню розміру діаметра внутрішнього отвору електроконтактної прокладки від 120 мм до 320 мм підвищується мінімальна температура в крайніх торцевих заготовках упродовж кампанії графітування майже на 100 °С (рис. 5.2), а в інших заготовках – не призводить до суттєвої зміни мінімальної температури.

Виявлено, що зміна значення внутрішнього діаметра прокладок майже не впливає на значення перепаду температури у крайніх заготовках, проте його збільшення від 120 мм до 320 мм призводить до підвищення перепаду в центральних заготовках майже на 200 °С впродовж кампанії графітування (рис. 5.3), що може негативно вплинути на якість готової електродної продукції.

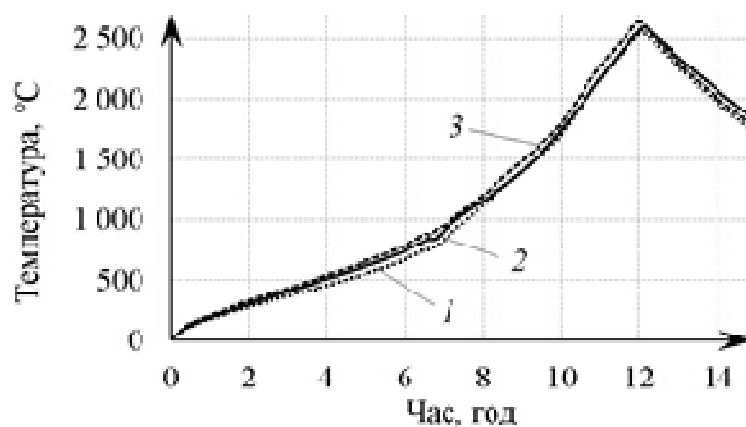


Рис. 5.2. Зміна мінімальної температури крайніх заготовок в електродних свічках під час їх нагрівання у разі використання кільцевих електроконтактних прокладок з різним значенням розміру внутрішнього діаметра: 1 – Ø120 мм; 2 – Ø220 мм; 3 – Ø320 мм

Встановлено, що радіальні значення розподілу температурних полів у середній частині заготовок майже не змінювалися в разі зміни внутрішнього діаметра електроконтактних прокладок.

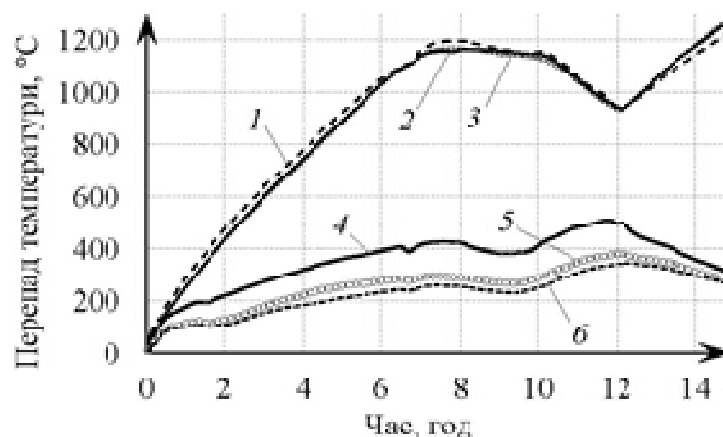


Рис. 5.3. Різниця між максимальними та мінімальними значеннями температури в заготовках у разі використання кільцевих електроконтактних прокладок з внутрішнім діаметром різного розміру: 1 (Ø320 мм), 2 (Ø220 мм), 3 (Ø120 мм) – перепад температури у крайніх заготовках; 4 (Ø320 мм), 5 (Ø220 мм), 6 (Ø120 мм) – перепад температури в центральних заготовках

Радіальні перепади температури в торцевих частинах заготовок визначалися в поперечному перерізі на відстані 50 мм від торця заготовок. Перепад температури визначався як різниця значень температури між центром і середнім значеннями температури у точках, розташованих на відстані 50 мм від периферії (рис. 5.4).

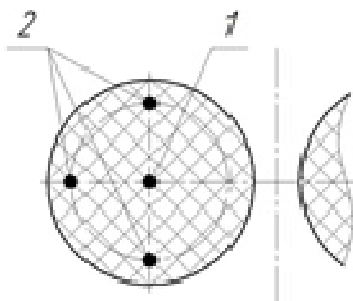


Рис. 5.4. Точки для визначення величини радіального перепаду температури в торцевій частині заготовок: 1 – центральна дослідна точка; 2 – периферійні дослідні точки

У результаті порівняння графіків зміни радіального перепаду температури в торцевій частині електродних заготовок упродовж кампанії графітування виявлено, що зменшення внутрішнього діаметра електроконтактних прокладок дає можливість значно зменшити перепад температур у центральних заготовках за високих температур процесу графітування (рис. 5.5).

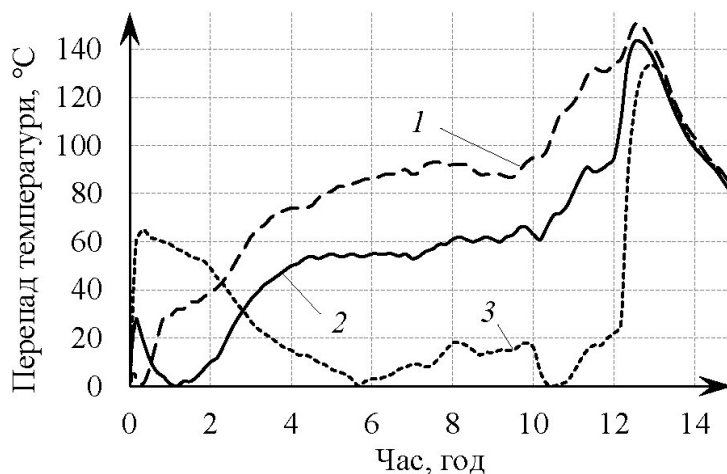


Рис. 5.5. Зміна перепаду температури в торцевій частині центральних заготовок під час їх нагрівання в разі використання кільцевих електроконтактних прокладок з внутрішнім діаметром різного розміру: 1 – Ø320 мм; 2 – Ø220 мм; 3 – Ø120 мм

Зміна радіального перепаду температур у торцевій частині крайніх заготовок характеризується зміщенням максимальних його значень у сторону більш високих температур у разі зменшення внутрішнього діаметра міжелектродних прокладок до 120 мм (рис. 5.6), що може негативно вплинути на якість готової електродної продукції.

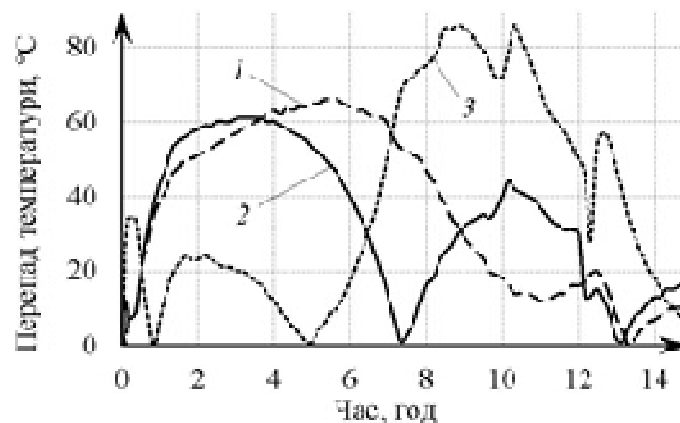


Рис. 5.6. Зміна перепаду температури в торцевій частині крайніх заготовок під час їх нагрівання в разі використання кільцевих електроконтактних прокладок з внутрішнім діаметром різного розміру: 1 – Ø320 мм; 2 – Ø220 мм; 3 – Ø120 мм

Числові дослідження з визначення впливу значення КЕО між заготовками на розподіл температурних полів в електродних свічках проводилися із використанням схеми завантаження печі графітування у дві свічки. Діаметр електродних заготовок і зовнішній діаметр прокладок становив 435 мм. Внутрішній діаметр електроконтактної прокладки складав 220 мм.

Під час числового аналізу теплоелектричного стану печі Кастнера температурна залежність значення КЕО [126] збільшувалася на коефіцієнт k , що прямопропорційно збільшувало значення КЕО в усьому температурному діапазоні.

Аналіз отриманих результатів числових експериментів показав, що збільшення значення коефіцієнта k (відповідно і збільшення значення КЕО між заготовками) дає змогу дещо підвищити мінімальну температуру у крайніх торцевих заготовках (рис. 5.7).

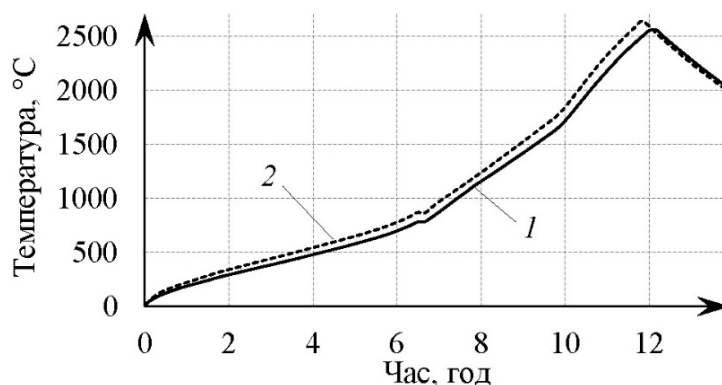


Рис. 5.7. Зміна мінімальної температури крайніх заготовок під час їх нагрівання в разі зміни значенням КЕО між електродними заготовками: 1 – $k = 1$; 2 – $k = 10$

Збільшення значення КЕО також спричинює зниження перепаду температури у крайніх заготовках за високих температур обробки. Але збільшення КЕО в десять разів призводить до підвищення перепаду в центральних заготовках електродної свічки більше ніж на 100 °C впродовж кампанії графітування (рис. 5.8), що може призвести до зниження якості готової електродної продукції.

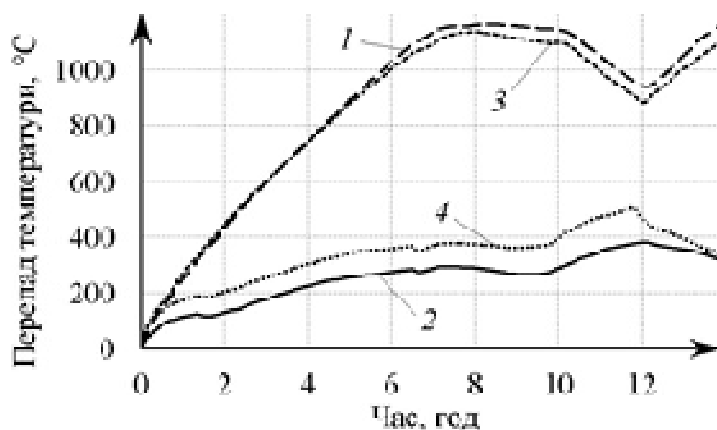


Рис. 5.8. Перепад температури в заготовках у разі зміни значення КЕО між електродними заготовками: 1 ($k = 1$), 3 ($k = 10$) – перепад температури у крайніх заготовках; 2 ($k = 1$), 4 ($k = 10$) – перепад температури в центральних заготовках

У результаті проведення числових досліджень встановлено, що оптимальним діаметром отвору електроконтактних кільцевих прокладок є отвір, розміри якого становлять близько 50–70 % від зовнішнього діаметра заготовок. Менше значення діаметра отвору призводить до перегріву центральної частини електродів, а більше – до значних радіальних перепадів температури.

Електроконтактні прокладки з підвищеним значенням електричного опору доцільно використовувати лише на кінцях електродних свічок, де вони дають змогу підвищити мінімальну температуру крайніх заготовок впродовж кампанії графітування. А це, відповідно, зменшує тривалість підведення електричної енергії до печі та питомі витрати електроенергії. Як матеріал для торцевих електроконтактних прокладок можливе використання графітового інтеркаляційного матеріалу [127, 128] з підвищеним значенням електричного опору, багат шарової структури, яка складається попарно з шарів терморозширеного графіту високої та низької густини [129], графітового порошку тощо.

З огляду на викладене, можна зробити такі висновки:

1) Проведено числові дослідження теплового стану печі графітування Кастнера за різних розмірів внутрішнього діаметра електроконтактних кільцевих прокладок і значеннях КЕО між електродними заготовками.

2) Виконано порівняння отриманих результатів температурних полів упродовж кампанії графітування. У результаті встановлено, що значне зменшення діаметра кільцевих електроконтактних прокладок призводить до перегріву центральної осової частини електродних свічок, а збільшення – до високих значень радіальних перепадів температури. Використання кільцевих прокладок з підвищеним електричним опором доцільне лише на кінцях електродних свічок.

5.3. Вплив вмісту води в теплоізоляційному матеріалі на тепловий стан печі Кастнера

Числові дослідження проводилися з використанням числової моделі теплоелектричного стану печі прямоточного графітування [118, 130] для схеми завантаження в одну колону, яка складалася із семи заготовок. Розміри заготовок мали такі значення $\varnothing 635 \times 2810$ мм. Як теплоізоляційний матеріал використовувався оборотний коксовий дріб'язок фракції $(-6+1)$ мм. Процес підведення електричної енергії до печі Кастнера складав 12 год.

Зіставлення результатів числового аналізу теплового стану печі Кастнера упродовж процесу графітування, у якій використовувався теплоізоляційний матеріал із вмістом води 9 % і 29 %, наведено на рис. 5.9–5.11.

Показано, що за відносної вологості теплоізоляційного матеріалу 9 % інтенсивне зростання температури розпочинається після досягнення рівня середньомасової температури 2400°C (див. рис. 5.9), що гарантує закінчення процесу видалення гетероатомів з усього об'єму заготовок за винятком торцевих частин крайніх заготовок у колоні. Використання теплоізоляційного матеріалу з вмістом води 29 % призводить до зміщення початку інтенсивного зростання температури в бік більш низьких середньомасових температур – 2250°C . Відповідно, значна кількість заготовок має рівень температур нижчий за 2100°C , тобто нижче верхнього рівня інтервалу видалення атомів сірки з об'єму заготовок [131], що може спричинити інтенсивне газовиділення, та, відповідно, утворення тріщин та брак готової продукції.

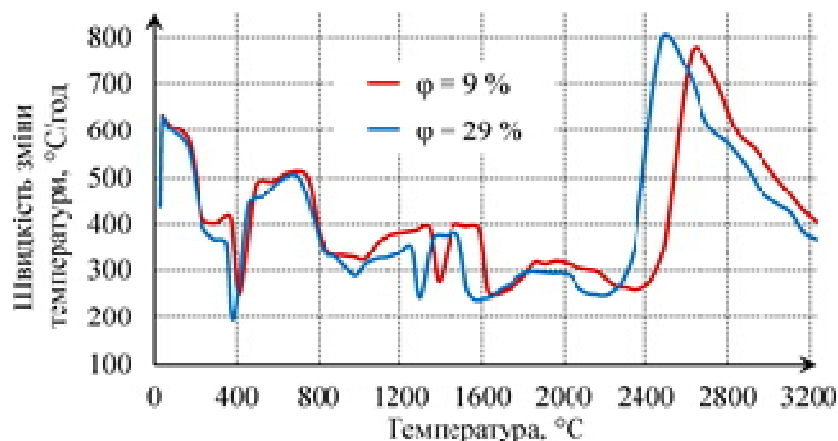


Рис. 5.9. Швидкість зміни середньомасової температури електродних заготовок залежно від досягнутого в них рівня середньої масової температури

Також встановлено, що збільшення вмісту води в теплоізоляції з 9 % до 29 % призводить до незначного зниження кінцевої мінімальної та середньомасової температури заготовок (див. рис. 5.10) і значного збільшення значення перепаду температур у заготовках – на 100°C (див. рис. 5.11).

Таким чином, у разі використання теплоізоляційного матеріалу печі з різним вмістом води доцільно на кінцевому етапі нагрівання електродної продукції коригувати графік введення потужності в піч за значенням розрахованої середньомасової температури в електродних заготовках для запобігання утворенню браку продукції або перевитраті електроенергії.

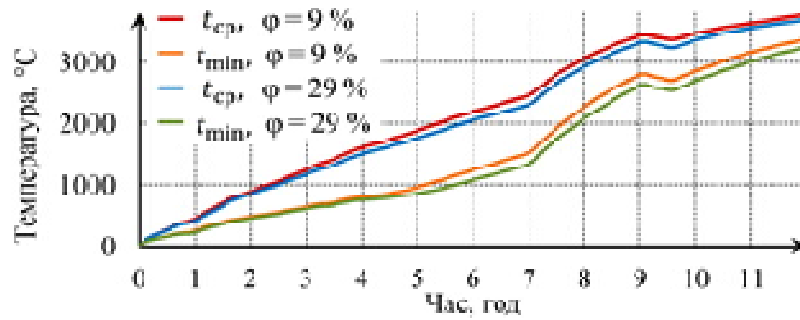


Рис. 5.10. Середні масові (t_{cp}) та мінімально досягнуті (t_{min}) значення температури в електродних заготовках

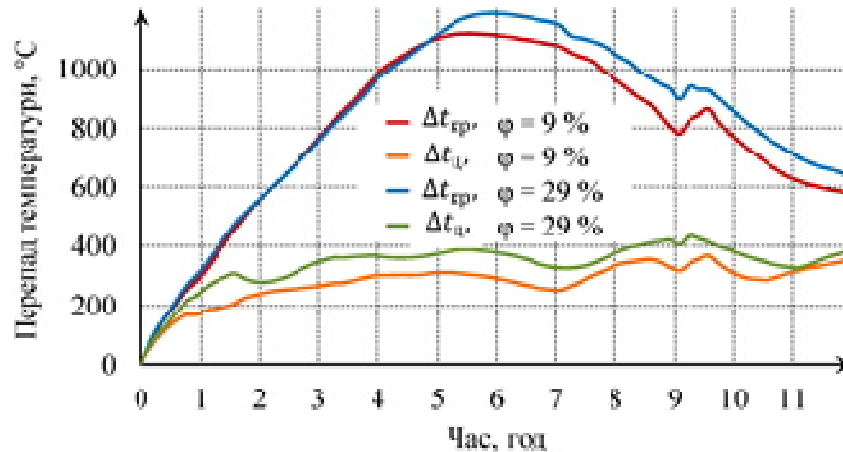


Рис. 5.11. Перепад температури у крайній (Δt_{cp}) та центральних ($\Delta t_{ц}$) електродних заготовках

З огляду на викладене, можна зробити такі висновки.

Для дослідження впливу вологовмісту теплоізоляційної шихти на тепловий стан печі використано числову модель теплоелектричного стану печі графітування Кастнера, в якій враховуються теплові ефекти хімічних реакцій газифікації вуглецевого матеріалу, механізм перенесення вологи та водяної пари, конверсію водню та оксидів вуглецю в теплоізоляційному матеріалі. У результаті проведення аналізу результатів числових експериментів встановлено, що нестабільність вологості теплоізоляційного матеріалу печі потребує коригування графіка введення електричної енергії в піч з метою запобігання механічного руйнування заготовок внаслідок високої швидкості їх нагрівання в небезпечному діапазоні температур, що характеризується інтенсивним виділення оксидів сірки, або перевитраті електроенергії.

5.4. Вплив габаритних розмірів заготовок на технологічні регламенти їх графітування

Оцінка допустимих перепадів температур і темпу нагрівання під час графітування виконано на підставі розрахунків міцності заготовок ІГ з використанням аналітичних залежностей і числового аналізу НДС (див. розд. 3).

Значення гранично допустимої різниці температури в радіальному напрямку заготовки та максимально допустимої швидкості нагрівання заготовок розраховані за аналітичними формулами (3.2), (3.3) з використанням даних табл. 6.1 та наведені в табл. 5.2, 5.3 для заготовок різного діаметра.

Таблиця 5.2. Гранично допустимі значення радіальної різниці температур/градієнта температури і темпу підйому температури під час графітування заготовок ІГ Ø300 мм (прожарений кокс (15–30 мкм)+40 % ВТП)

$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\max}, ^\circ\text{C/grad } t, \text{ К/м}$	$V_{t \max}, \text{ К/год}$
100	573/3818	34,2
1000	512/3415	101,9
1500	471/3143	200,9
2000	443/2951	251,6
2500	413/2750	293,0
3000	393/2622	279,3

Таблиця 5.3. Гранично допустимі значення радіальної різниці температур/градієнта температури і темпу підйому температури під час графітування заготовок ІГ Ø600 мм (прожарений кокс (15–30 мкм)+40 % ВТП)

$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\max}, ^\circ\text{C/grad } t, \text{ К/м}$	$V_{t \max}, \text{ К/год}$
100	573/1909	8,5
1000	512/1708	25,5
1500	471/1571	50,2
2000	443/1476	62,9
2500	413/1375	73,3
3000	393/1311	69,8

З порівняння даних табл. 5.2 і 5.3 випливає, що збільшення діаметра заготовок ІГ удвічі (від 300 мм до 600 мм) не впливає на максимально допустимі радіальні перепади температур, оскільки у формулі (3.2) Δt_{\max} не залежить від радіуса заготовки. Однак, при цьому максимально допустимі радіальні градієнти температур збільшуються удвічі, а темп підйому температури – у чотири рази, оскільки у формулі (3.3) $V_{t \max}$ залежить від радіуса заготовки у другому степені й тому тривалість процесу графітування збільшується з 15,5 год до 62 год.

Результати порівняння допустимо можливих темпів нагрівання заготовок ІГ (за яких не відбувається тріщиноутворення у заготовках) залежно від рівня температури обробки заготовок ІГ (регламент графітування) для різних діаметрів заготовок наведено на рис. 5.12.

З аналізу графіків (див. рис. 5.12) видно, що габаритні розміри заготовок ІГ однозначно впливають на регламент їх графітування, що проявляється на зміні темпу нагрівання заготовок та відповідно на тривалості процесу. Тобто, зі збільшенням габаритних розмірів заготовок ІГ темп їх нагрівання зменшується, що відповідно призводить до збільшення тривалості процесу графітування.

Для визначення одночасного впливу температурного й силового навантаження на заготовки ІГ під час графітування проведено числовий аналіз НДС (див. п. 2.7, 2.9), результати якого наведено на рис. 5.13–5.15.

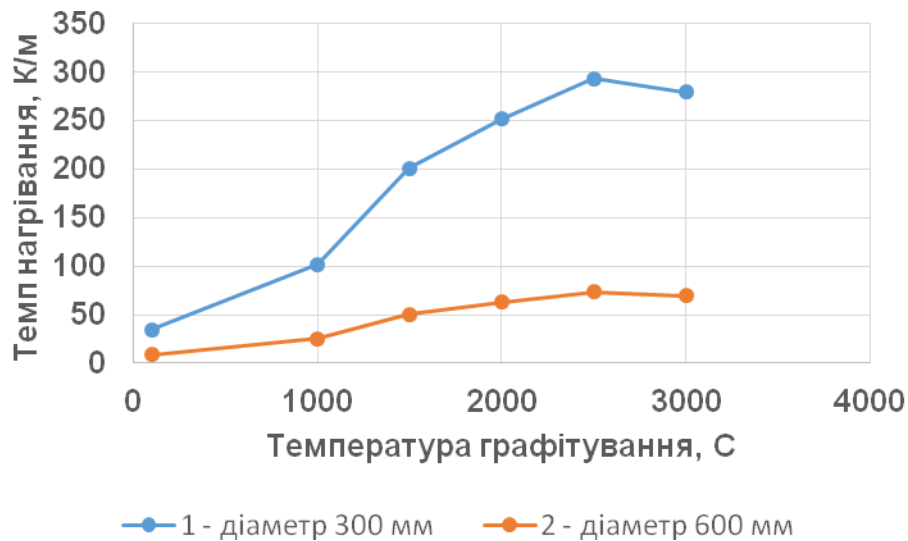


Рис. 5.12. Порівняння регламентів графітування заготовок ІГ різних діаметрів

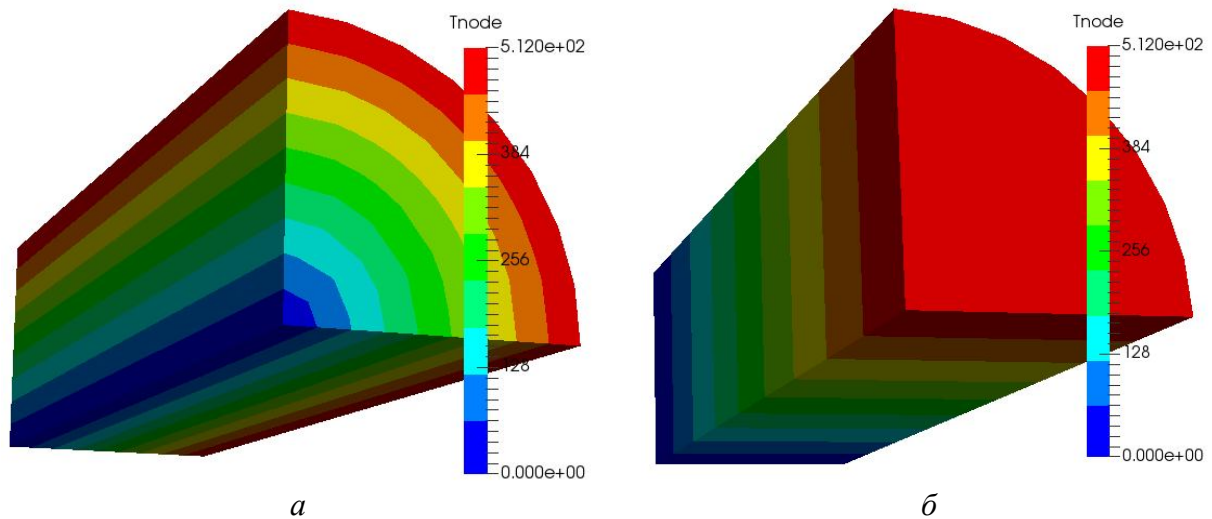


Рис. 5.13. Радіальне і осьове температурне навантаження заготовок ІГ (Ø300 мм і Ø600 мм) під час графітування на рівні температур обробки 1000 °С: *a* – $\Delta t_r = 512$ °С;
б – $\Delta t_z / 2 = 512$ °С;

З проведеного аналізу НДС під час графітування заготовок ІГ (Ø300 мм і Ø600 мм) у печі Кастнера випливає, що:

- запас міцності заготовок під час спільної дії радіальних перепадів температури $\Delta t_r = 393$ – 512 °С і стискального осьового зусилля 50 МПа становить більше одиниці, що забезпечує умови бездефектного їх графітування;
- запас міцності заготовок під час спільної дії осьових перепадів температури $\Delta t_z = 800$ – 1000 °С і стискального осьового зусилля 50 МПа становить більше одиниці, що забезпечує умови бездефектного їх графітування;
- значення величини сталого осьового градієнту температури взагалі не впливає на запас міцності заготовок;
- стискальні зусилля заготовок у свічках виключають їх розтягнення під дією значних радіальних і осьових перепадів температур.

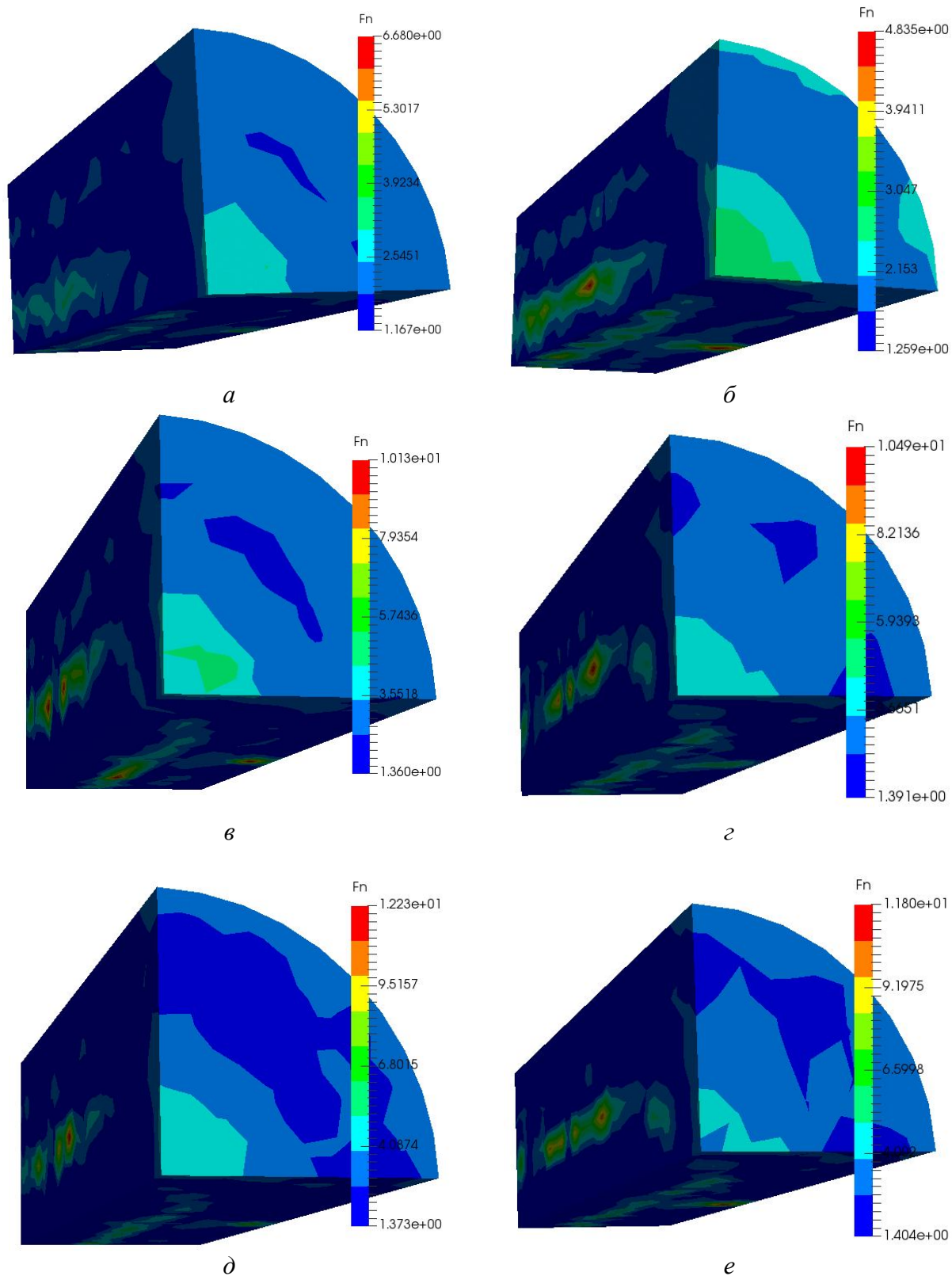
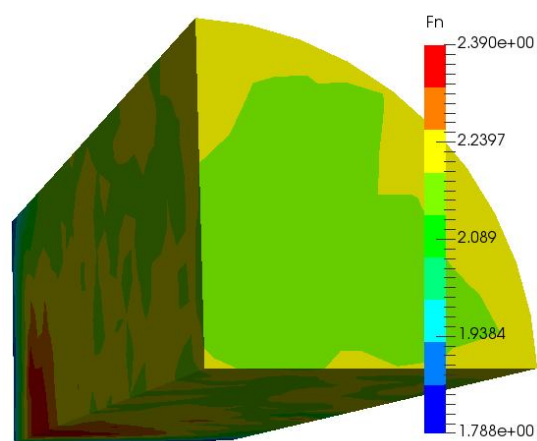
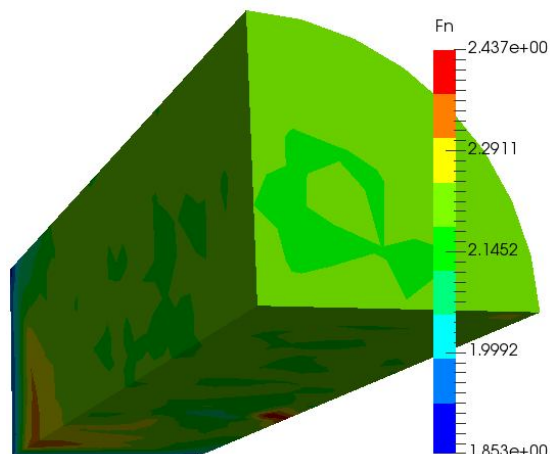


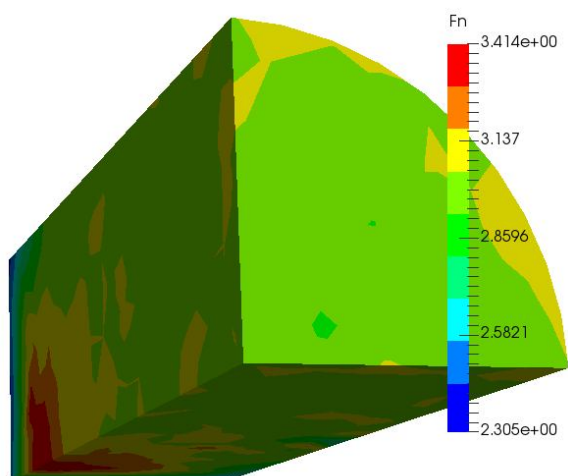
Рис. 5.14. Поля запасу міцності заготовок ІГ під час графітування (температурне навантаження Δt_r і силоне – зусилля стискання – 50 МПа): а, в, д – $\varnothing 300$ мм, довжина – 1000 мм; б, г, е – $\varnothing 600$ мм – 2500 мм;
а, б – $\Delta t_r = 512$ °C; в, г – $\Delta t_r = 443$ °C; д, е – $\Delta t_r = 393$ °C



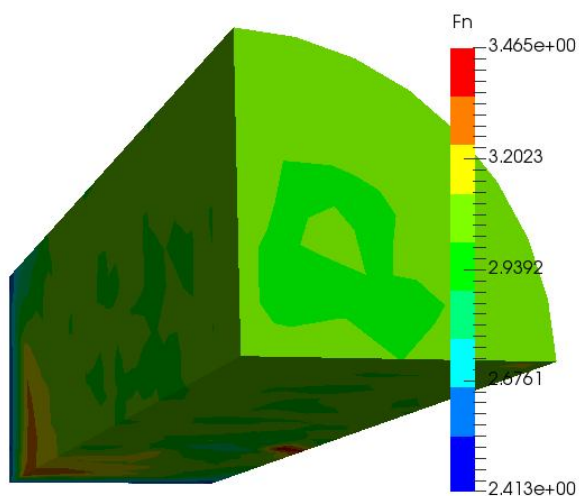
a



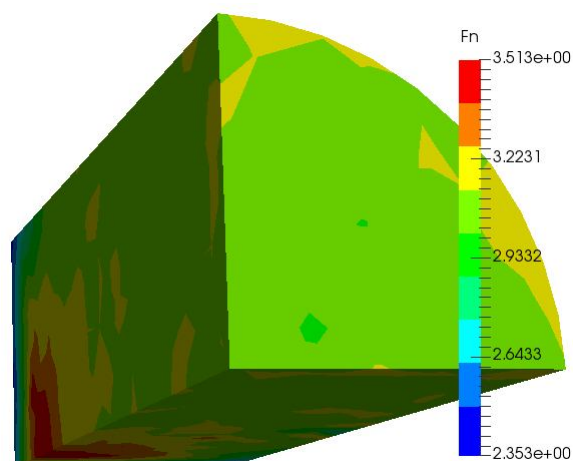
б



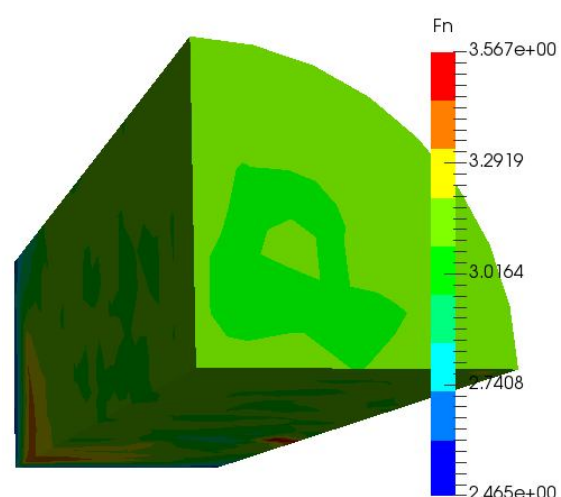
в



г



д



е

Рис. 5.15. Поля запасу міцності заготовок ІГ під час графітування (температурне навантаження Δt_z і силове – зусилля стискання – 50 МПа): *a, в, д* – $\varnothing 300$ мм, довжина – 1000 мм; *б, г, е* – $\varnothing 600$ мм – 2500 мм;
a, б – $\Delta t_z / 2 = 512$ °C; *в, г* – $\Delta t_z / 2 = 443$ °C; *д, е* – $\Delta t_z / 2 = 393$ °C

Результати виконаного числового аналізу НДС заготовок ІГ під час графітування в печі Кастнера дають підставу стверджувати, що наявність стискального зусилля свічок протидіють виникненню небезпечних розтягувальних напружень в осьовому напрямку. Тому, оскільки, під час графітування заготовок в печі Кастнера найбільші перепади температур виникають в осьовому напрямку, гранично допустимі темпи підйому температури під час графітування, наведені в табл. 5.2, 5.3 і на рис. 5.12, можна збільшити у 1,5–2,0 рази, що не погіршить умови бездефектного графітування.

5.5. Висновки до розділу 5

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1) Досліджено вплив габаритних розмірів заготовок ІГ на технологічні регламенти їх випалювання. Встановлено, що збільшення діаметра заготовок удвічі призводить до зменшення гранично допустимого значення радіального градієнта температур удвічі. При цьому тривалість процесу випалювання збільшується у чотири рази.

2) Виконано дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів на процес прямого графітування заготовок у печах Кастнера. Встановлено, що значне зменшення діаметра кільцевих електроконтактних прокладок призводить до перегріву центральної осьової частини електродних свічок, а збільшення – до високих значень радіальних перепадів температури. Використання кільцевих прокладок з підвищеним електричним опором доцільне лише на кінцях електродних свічок.

3) Проведено дослідження впливу вмісту вологи в теплоізоляційному матеріалі на тепловий стан печі Кастнера. Встановлено, що нестабільність вологості теплоізоляційного матеріалу печі потребує коригування графіка введення електричної енергії в піч для запобігання механічного руйнування заготовок внаслідок високої швидкості їх нагрівання в небезпечному діапазоні температур, що характеризується інтенсивним виділення оксидів сірки, або перевитраті електроенергії.

4) Виконано дослідження впливу габаритних розмірів заготовок ІГ на технологічні регламенти їх графітування. Встановлено, що габаритні розміри заготовок ІГ однозначно впливають на регламент їх графітування, що проявляється на зміні темпу нагрівання заготовок та відповідно на тривалості процесу. Тобто, зі збільшенням габаритних розмірів заготовок ІГ темп їх нагрівання зменшується, що відповідно призводить до збільшення тривалості процесу графітування.

6. ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАГОТОВОК ІЗОСТАТИЧНОГО ГРАФІТУ НА ПЕРЕДІЛАХ ЇХ ТЕРМООБРОБЛЕННЯ

6.1. Схема і методика експериментальних досліджень процесу графітування великогабаритних заготовок ізоостатичного графіту

Для виконання експериментальних досліджень теплоелектричного стану печі Кастнера під час термооброблення заготовок ІГ діаметром 600 мм і довжиною 2840 мм розроблена схема встановлення термопар (рис. 6.1–6.6).

Розроблена схема вимірювань дає змогу визначити:

- рівень температур та їх перепад по перерізу центральної заготовки свічки в її торцевій і центральній частинах;
- температуру та її перепад по перерізу крайньої заготовки в її торцевій частині;
- температуру та її перепад по осі заготовки між її торцевою й центральною частинами;
- температуру та її перепад на поверхні заготовки між її торцевою й центральною частинами;
- перепад температури між осями двох напівсвічок у центральній й торцевій частин печі;
- температуру в бічній, подовій і верхній теплоізоляції.

Для зменшення кількості заготовок з порушеною геометрією за рахунок виготовлення отворів для встановлення термопар переріз у центральній частині печі вибирався максимально близько до торця заготовки, але не в зоні впливу торцевого ефекту.

Для визначення втрати активної потужності електроенергії до входу в піч, запропоновано вимірювання падіння напруги між струмопідводами печі.

Експериментальні дослідження заплановано супроводжувати вимірюваннями геометричних і масових (вагових) параметрів печі, заготовок і сипкої теплоізоляційної шихти, а також визначенням вологості, матеріального і гранулометричного складу теплоізоляції.

Контроль та збір даних від термодатчиків проводиться на базі вимірювального комплексу із застосуванням модулів збору даних ICP CON I-7018 виробництва компанії ICP_DAS [132] і дільника електричної напруги. Дискретність запитів даних модулів збору даних становить 10 Гц. Модулі зв'язуються у вимірювальну мережу за допомогою двопровідного напівдуплексного багатоточкового послідовного інтерфейсу RS-485. Для зв'язку модулів збору даних з персональним комп'ютером вимірювального комплексу використовується модуль перетворення інтерфейсів RS-485↔RS-232 – I-7520 (ICP_DAS).

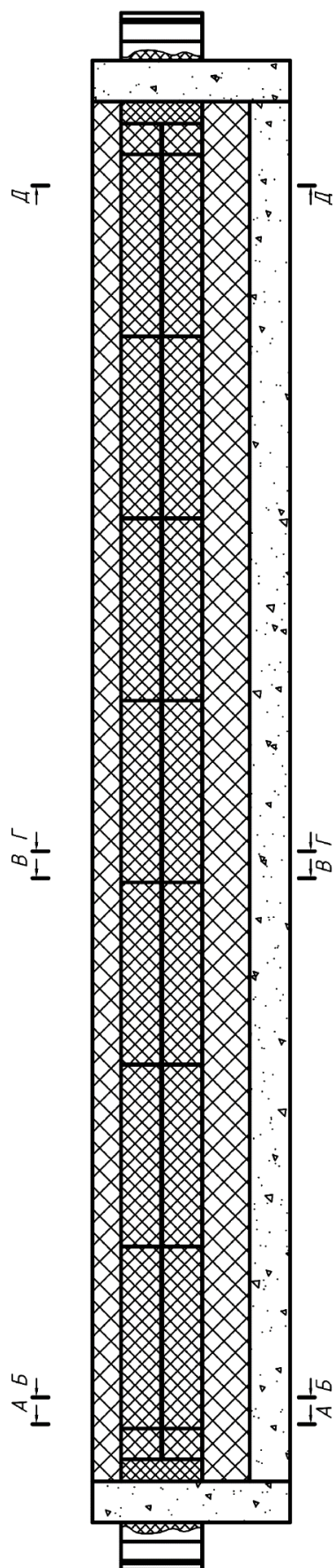


Рис. 6.1. Контрольовані перерізи печі Кастнера під час дослідної кампанії

A-A

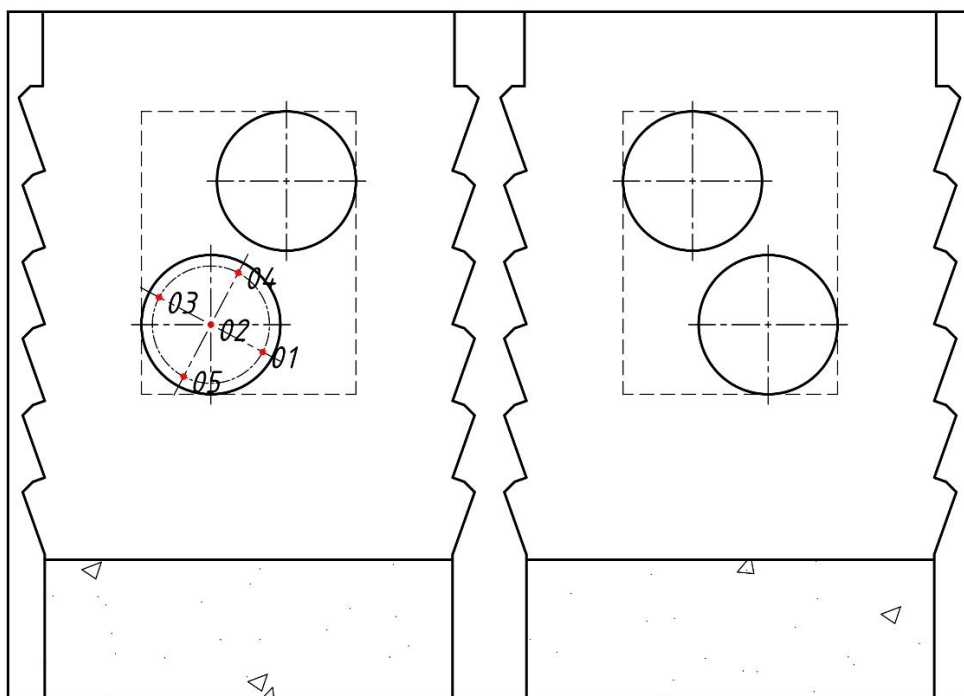


Рис. 6.2. Розміщення термопар у перерізі А-А печі Кастнера під час дослідної кампанії

Б-Б

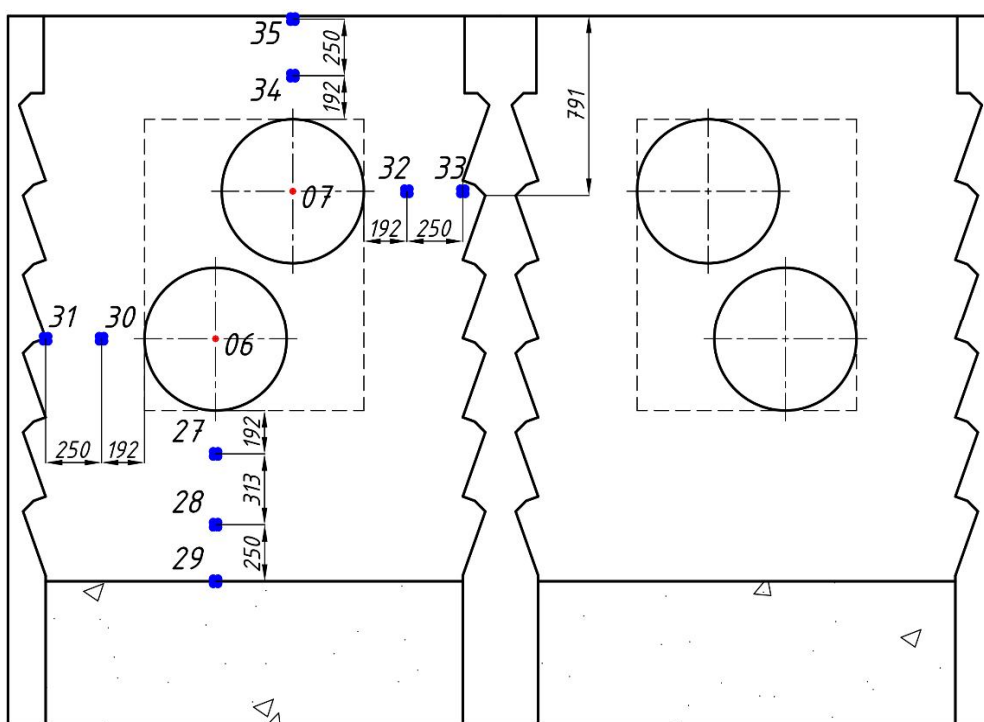


Рис. 6.3. Розміщення термопар у перерізі Б-Б печі Кастнера під час дослідної кампанії

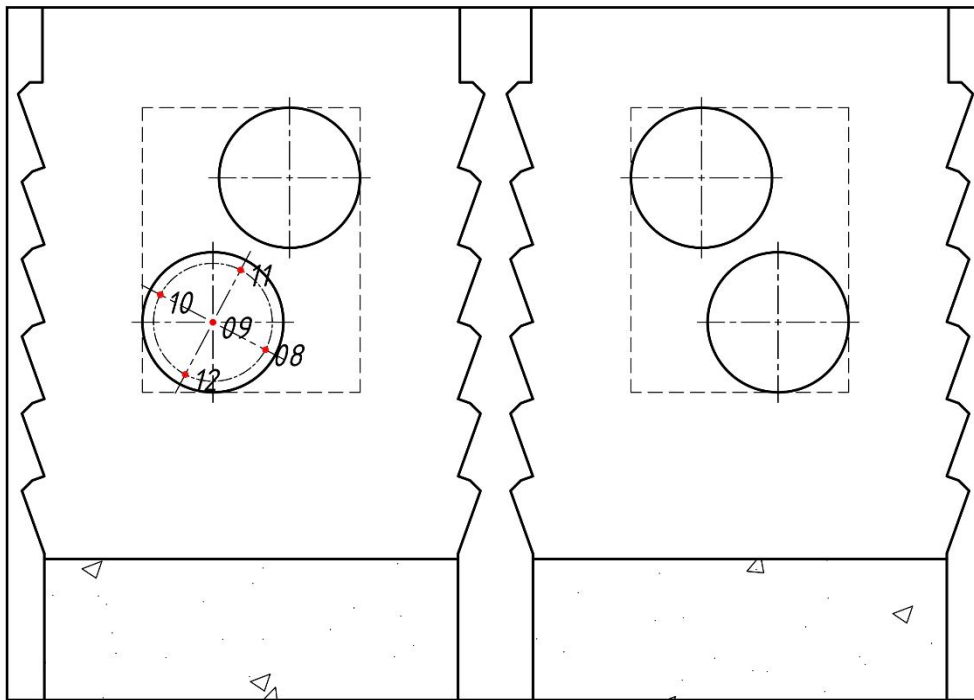
$B-B$ 

Рис. 6.4. Розміщення термопар у перерізі В–В печі Кастнера під час дослідної кампанії

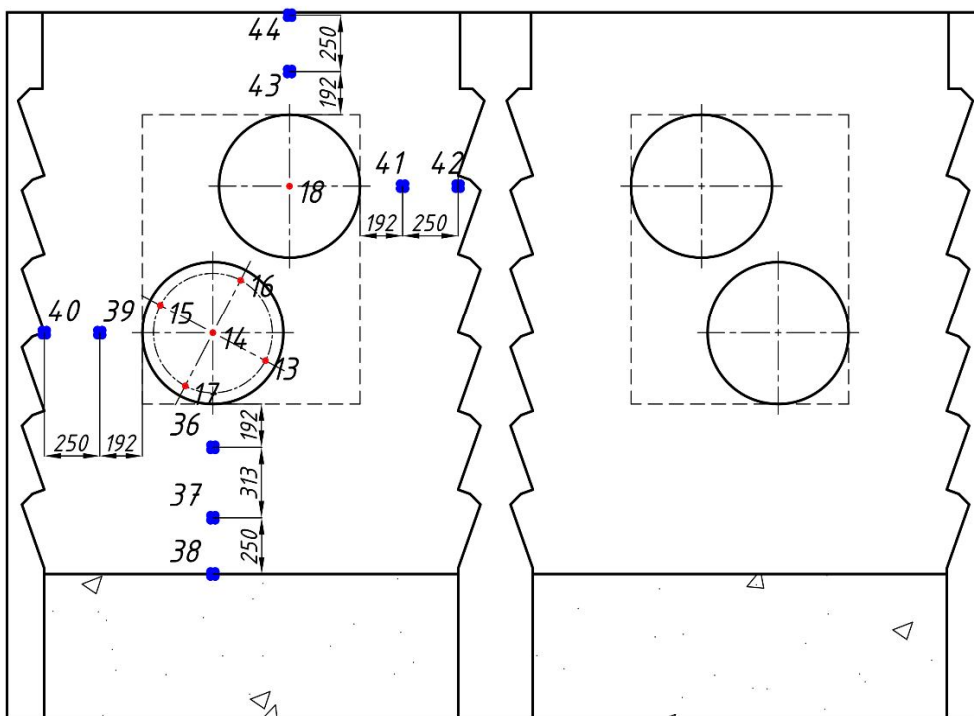
 $\Gamma-\Gamma$ 

Рис. 6.5. Розміщення термопар у перерізі Г–Г печі Кастнера під час дослідної кампанії

Д-Д

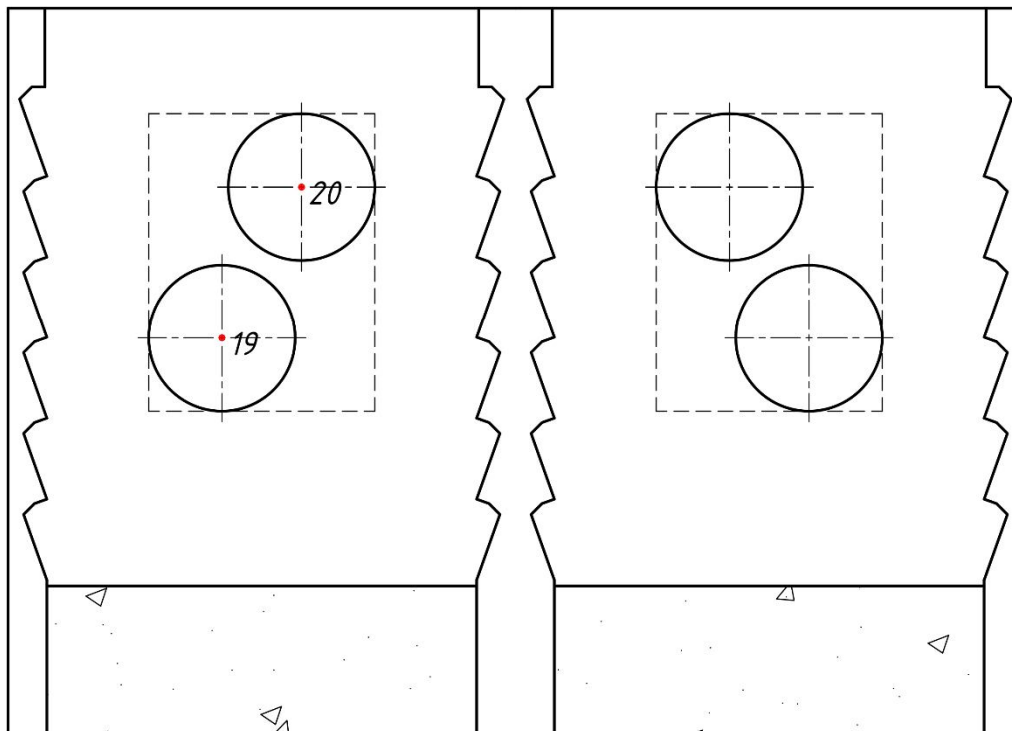


Рис. 6.6. Розміщення термопар в перерізі Д-Д печі Кастнера під час дослідної кампанії

Запит та обробка даних виконується за допомогою встановленого на персональному комп'ютері програмного забезпечення, розробленого НДЦ «РТ» [132] і дає змогу виконувати:

- формування та тестування мережі модулів збору даних;
- вибір частоти опитування модулів (до 10 Гц);
- вибір типу датчика;
- збереження даних на зовнішньому або внутрішньому носії інформації з можливістю задавання частоти збереження;
- відображення даних на екрані в числовому та графічному вигляді в режимі реального часу.

6.2. Дані залежностей теплофізичних, механічних та електричних властивостей заготовок ізостатичного графіту на переділах випалювання і графітування

Дані з комплексу фізичних властивостей матеріалу заготовок ІГ необхідні перш за все для виконання розрахунків раціональних регламентів їх випалювання і графітування на інтервалі зміни температур до 3000 °С, які включають теплові й теплоелектричні розрахунки та розрахунки на міцність. Фізичні властивості заготовок ІГ на інтервалі зміни температур до 900 °С для проведення розрахунків процесу випалювання наведено в п. 3.1 у табл. 3.1 для певного матеріального та гранулометричного складу коксопекової композиції. Дослідження цих властивостей на інтервалі до 900 °С є складною задачею.

Складність експериментальних досліджень фізичних властивостей ІГ на інтервалі до 3000 °С значно підвищується, а інколи такі дослідження навіть стають технічно неможливими. Тому в дослідженнях для визначення деяких фізичних властивостей ІГ інтервалі до 3000 °С використані їхні оцінки за даними, отриманими за значно нижчих температур.

Оцінки фізичних властивостей ІГ на інтервалі до 3000 °С, які потрібні для визначення раціональних регламентів графітування виконано на базі даних табл. 3.1 і [133, 134]. Зокрема, температурні залежності коефіцієнта теплопровідності, масової ізобарної теплоємності та характер температурної зміни механічних властивостей наведено в праці [133], а характер зміни з температурою КТР – у праці [134]. Результати такої оцінки фізичних властивостей ІГ наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1. Оцінка зміни фізичних властивостей матеріалу випалених заготовок ІГ з початковим складом (прожарений кокс ($\delta_c = 15\text{--}30$ мкм)+40 % ВТП) під час графітування

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$E, \text{ГПа}$	$\sigma_c, \text{МПа}$	$\sigma_p^*, \text{МПа}$	α, K^{-1}
100	1620	1,9	2,1	17	105	35	$5,5 \times 10^{-6}$
1000	1700	2,0	7	17	110	37	$6,5 \times 10^{-6}$
1500	1750	2,15	15	20,4	132	44	$7,0 \times 10^{-6}$
2000	1800	2,2	20	23,5	152	51	$7,5 \times 10^{-6}$
2500	1850	2,25	25	30,6	198	66	$8,0 \times 10^{-6}$
3000	1850	2,25	25	23,8	156	52	$8,5 \times 10^{-6}$

Примітка: Коефіцієнт Пуассона ІГ $\nu=0,20\text{--}0,27$; $\sigma_p^* = \sigma_c/3$ – міцність на розрив, що використовується для розрахунків на міцність

Як зазначалося в розд. 3, важливою фізичною властивістю заготовок ІГ є інтенсивність газовиділення. Дані про інтенсивність газовиділення із заготовок ІГ під час їх термічної обробки є вкрай важливими для розробки раціональних регламентів їх випалювання. Тому, експериментальні дослідження інтенсивності газовиділення заготовок ІГ були виконані на лабораторній базі НДЦ «РТ» [135], результати яких наведено на рис. 6.7.

Аналізуючи табличні дані зі зміни фізичних властивостей матеріалу заготовок ІГ залежно від температури обробки (див. табл. 3.1) і графіки інтенсивності газовиділення (рис. 6.7) видно, що максимум інтенсивності газовиділення збігається з мінімумом таких важливих механічних властивостей як модуль пружності, границі міцності під час стискання і розтягу. Цей факт дає підставу для використання графіків інтенсивності газовиділення для розробки раціональних регламентів випалювання заготовок ІГ у разі відсутності відповідних даних з фізичних властивостей. При цьому мінімальний темп нагрівання заготовок ІГ має відповідати максимуму інтенсивності газовиділення.

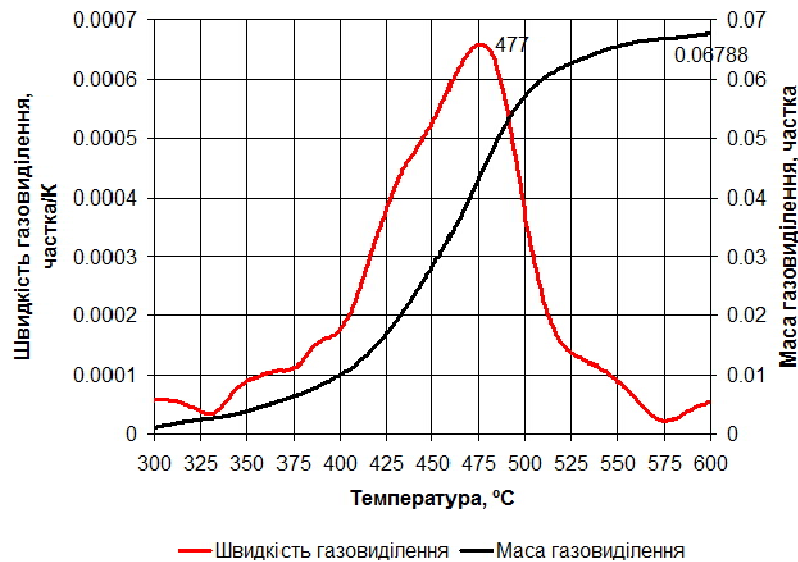


Рис. 6.7. Динаміка інтенсивності газовиділення і втрата маси заготовок ІГ (наповнювач – кокс прожарений голчастий $\delta_c = 150$ мкм, зв’язуюче – пек ВТП – 22,5 % (за мас.))

Для виконання числового аналізу процесу прямоточного графітування однією з важливих фізичних властивостей є коефіцієнт електропровідності матеріалу ІГ. Температурну залежність ПЕО (оберненої величини до коефіцієнта електропровідності) заготовок ІГ наведено на рис. 6.8. Ці дані було отримано з використанням лабораторної бази НДЦ «РТ» [135].

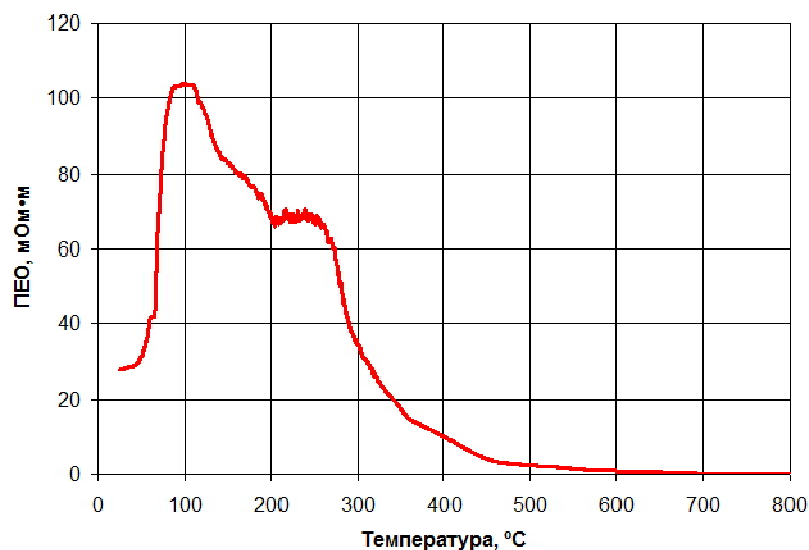


Рис. 6.8. Температурна залежність ПЕО заготовок ІГ (наповнювач – кокс прожарений голчастий $\delta_c = 150$ мкм, зв’язуюче – пек ВТП – 22,5 % (за мас.))

6.3. Висновки до розділу 6

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1) Розроблено схему й методику експериментальних досліджень процесу графітування великогабаритних заготовок ізостатичного графіту в печах прямоточного графітування Кастнера.

2) Визначено комплекс фізичних властивостей матеріалу заготовок ІГ на інтервалі зміни температур до 3000 °С, що є необхідним для відпрацювання раціональних регламентів випалювання і графітування, які включають теплові та теплоелектричні розрахунки та розрахунки на міцність.

3) Встановлено, що динаміку інтенсивності газовиділення можна застосовувати для розробки раціональних регламентів випалювання заготовок ІГ у разі відсутності відповідних даних з фізичних властивостей. При цьому мінімальний темп нагрівання заготовок ІГ має відповідати максимуму інтенсивності газовиділення.

4) Експериментальні дослідження інтенсивності газовиділення і ПЕО заготовок ІГ виконано на лабораторній базі НДЦ «РТ» КПІ ім. Ігоря Сікорського.

7. ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ІЗОСТАТИЧНОГО ГРАФІТУ

7.1. Технічне рішення з об'єднання процесів випалювання і графітування заготовок ізостатичного графіту

Технічне рішення належить до технології та обладнання перероблення твердого вуглецевмісного матеріалу і може бути використано в хімічній і металургійній галузях промисловості, зокрема для одержання високоякісних електродних виробів.

Технологія графітованих виробів, зокрема, виробів ізостатичного графіту, передбачає два послідовно виконувані теплотехнічні процеси, яким піддають заготовки з вуглецевмісного матеріалу: випалювання та графітування.

Найбільш близьким за технічною сутністю до пропонованого технічного рішення є спосіб одержання графітованих виробів, що включає формування вуглецевих заготовок, їх випалювання та наступне графітування, при цьому графітування здійснюють після охолодження випалених вуглецевих заготовок та перевантаження їх з печі випалювання в піч графітування [9].

Недоліком цього способу є низька енергоефективність, оскільки він передбачає охолодження розігрітої під час випалювання вуглецевих заготовок для перезавантаження їх у піч графітизації з подальшим їх розігрівом і проведення процесу графітизації. Також при цьому істотно збільшується загальна тривалість циклу одержання графітованих виробів, що негативно впливає на продуктивність способу.

В основу технічного рішення покладено задачу вдосконалення способу одержання графітованих виробів, у якому його нова реалізація забезпечує зниження енергоємності та збільшення продуктивності технології графітованих виробів, а отже й зниження вартості зазначених виробів.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі одержання графітованих виробів, що включає формування вуглецевих заготовок, їх випалювання та наступне графітування, згідно з пропонованим технічним рішенням новим є те, що процеси випалювання та графітування реалізують у печі прямого нагріву за умови одного циклу завантаження печі вуглецевими заготовками. У найприйнятніших прикладах реалізації способу перед завантаженням вуглецевих заготовок у піч на боковій поверхні кожної з них улаштовують теплозахисний шар, виконаний зокрема з електропровідного матеріалу, наприклад, сипкого вуглевмісного матеріалу.

У разі реалізації способу за найближчим аналогом спочатку здійснюють формування вуглецевих заготовок, після чого їх піддають випалюванню в спеціальній випалювальній печі. При цьому зазначені вуглецеві заготовки піддають тепловій дії за температури 1200–1300 °С без доступу повітря, у

результаті чого одержують випалені заготовки, які після охолодження випалювальної печі вивантажують з неї й завантажують у піч прямого нагріву для подальшого графітування зазначених заготовок, яке відбувається впродовж (6–10) год за температури (250–3000) °С. Тривалий час процесу випалювання зумовлений потребою повільного нагрівання «зелених» заготовок (не більше (1–1,5) К/год у діапазоні інтенсивного виділення летких) для забезпечення низької різниці температури по об'єму кожної заготовки (наприклад для виробів з дрібнодисперсним наповнювачем не більше (3–5) °С у поперечному перерізі).

Відповідно ж до пропонованого технічного рішення процеси випалювання та графітування реалізують у печі прямого нагріву за умови одного циклу завантаження печі вуглецевими заготовками, тобто процес графітування можна проводити безпосередньо після процесу проведення випалювання, поступово підвищуючи температуру без проміжного охолодження.

У разі улаштування на боковій поверхні кожної із заготовок теплозахисного шару забезпечується гарантоване вирівнювання температури по товщині (радіусу) заготовки, що піддається випалюванню та графітуванню, оскільки завдяки зазначеному шару найбільший градієнт температури, який зазвичай спостерігається на поверхні заготовки, переміщується на зовнішню поверхню теплозахисного шару. Це дає змогу збільшити швидкість нагрівання заготовок, а отже й продуктивність технології. Виконання ж теплозахисного шару з електропровідного матеріалу, наприклад, сипкого вуглевмісного матеріалу забезпечує додатковий розігрів зазначеного шару під час нагрівання заготовок у печі прямого нагріву під дією електричного струму, що проходить крізь теплозахисний шар, а отже й додатково зменшує градієнт температури на поверхні оброблюваних заготовок, що підвищує ймовірність одержання високоякісних графітованих виробів.

Порівняно з найближчим аналогом пропонований спосіб дає змогу знизити енергоємність до 25 % та в декілька разів збільшити продуктивність технології графітованих виробів.

7.2. Енергоефективний регламент графітування заготовок ізостатичного графіту в печі Кастнера

З використанням числової моделі теплоелектричного стану печі Кастнера (див. розд. 4) розроблено енергоефективний регламент графітування заготовок ІГ діаметром 300 мм в один ряд тривалістю 15 год (рис. 7.1, 7.2).

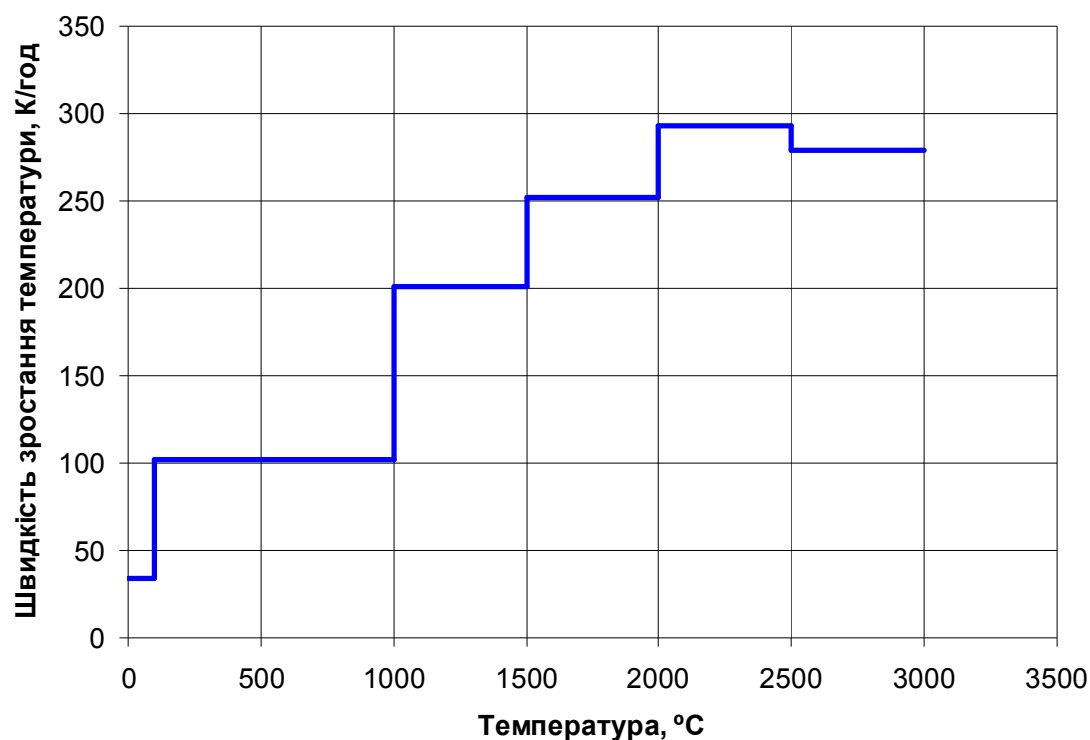


Рис. 7.1. Гранично допустимий темп зростання середньої масової температури заготовок ІГ діаметром 300 мм під час графітування

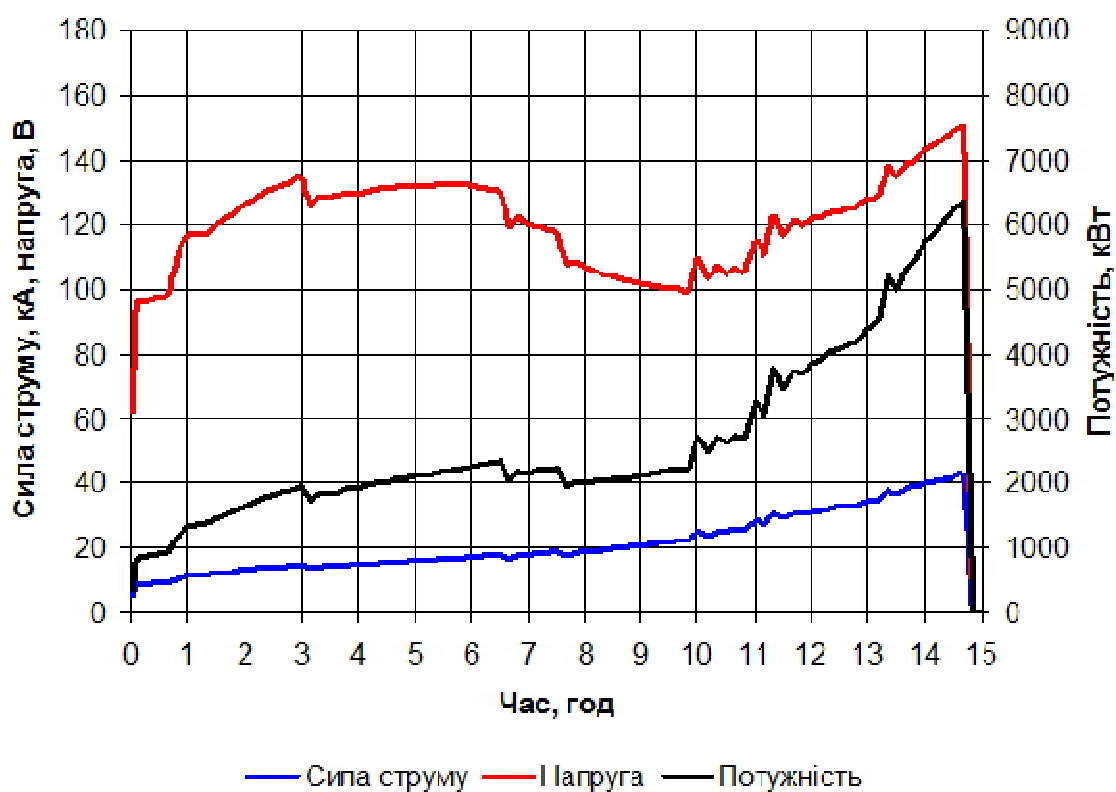


Рис. 7.2. Електричні параметри печі Кастнера під час графітування заготовок ІГ діаметром 300 мм в одну колону

7.3. Висновки до розділу 7

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1) Розроблено енергозберігаюче технічне рішення високо температурного оброблення заготовок ізостатичного графіту, яке полягає в об'єднанні процесів випалювання і графітування. Це дає змогу знизити енергоємність процесу термообробки до 25 % і в декілька разів збільшити продуктивність технології графітованих виробів.

2) Розроблено енергозберігаючий регламент графітування заготовок ІГ діаметром 300 мм у печі Кастнера з метою його реалізації в промислових умовах.

ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

Головним результатом проведених досліджень стала нова інноваційна технологія одержання виробів ізостатичного графіту, яка не має аналогів в Україні, та рекомендації щодо вибору сировинної бази для забезпечення потрібних фізичних властивостей ізотропного графіту, технологічного обладнання, технологічних регламентів устаткування та технічних рішень стосовно модернізації діючого обладнання.

1. На підставі літературного огляду стану питання експериментального дослідження й математичного моделювання процесів та обладнання для одержання ізостатичного графіту було сформульовано концепцію технологічного процесу отримання заготовок ізотропного графіту з підвищеними характеристиками міцності, обґрунтовано доцільність використання числового моделювання спільно з вибірковими (окремими) фізичними експериментами для розробки раціональних конструкцій та регламентів технології виробництва ІГ.

2. Здійснено вибір сировинної бази для отримання заготовок ізостатичного графіту. Визначено раціональний склад коксопекової композиції, який включає прожарений кокс з розміром зерна 30 мкм і високотемпературного пеку – 35–40 % (за мас.). Виконано вибір обладнання для тонкого подрібнення та класифікації наповнювача для отримання наповнювача ізостатичного графіту. Визначено раціональні регламенти подрібнення наповнювача й підготовки преспорошку.

3. Сформульовано вимоги до пресованих заготовок ізостатичного графіту. Визначено раціональний склад преспорошку та енергоефективний регламент її пресування. Визначено вплив габаритних розмірів заготовок на склад переспорошку коксопекової композиції та регламент їх пресування.

4. Визначено фізичні властивості «зелених» заготовок з різним фракційним та матеріальним складом. Сформульовано математичну модель напружено-деформованого стану заготовок ізостатичного графіту.

5. Встановлено, що зі збільшенням габаритних розмірів «зелених» заготовок ІГ, зокрема, їх діаметра від 300 мм до 600 мм, показники міцності останніх значно знижуються. Для формування великогабаритних заготовок діаметром 600 мм і завдовжки 2500 мм треба застосовувати ізостатичне пресування, а для заготовок діаметром до 300 мм і довжиною 1000 мм – можна використовувати спосіб пресування у матрицю.

6. З використанням точних аналітичних розв'язків і числового моделювання НДС під дією температурного навантаження визначено гранично допустимі режими випалювання заготовок ізостатичного графіту та отримано максимальні значення перепадів та градієнтів температур залежно від температури випалу. Встановлено, що для «зелених» заготовок ІГ на інтервалі температур випалювання до 900 °С гранично допустимі значення градієнта температури складають (10–36) К/м з мінімумом за температури 500 °С, а темп зростання температури не повинен перевищувати (0,3–1,9) К/год (середнє

значення 1 К/год), що визначає тривалість процесу випалювання близько (800–900) год.

7. На підставі проведених досліджень НДС заготовок ІГ виконано підбір пічного обладнання – електропід з викочуванням подом, яка забезпечує такі температурні умови процесу термооброблення високоусадкових графітових матеріалів, що мінімізують ймовірність утворення тріщин та сколів останніх.

8. Розроблено фізичну, математичну й числові моделі процесу випалювання заготовок ІГ в електропечах з викочуванням подом, що дає змогу: визначати раціональні регламенти випалювання заготовок ІГ за різних габаритних розмірів та різного гранулометричного та матеріального складу; за наперед заданим темпом нагрівання заготовок у печі визначати максимальні (гранично допустимі) перепади температур у радіальному та осьовому напрямках заготовок та відповідні компоненти градієнта температури.

9. Виконано верифікацію розробленої числової моделі тепло-гідродинамічного стану печі з викочуванням подом на даних аналітичних розв'язків. Встановлено, що похибка визначення гранично допустимих перепадів температур заготовок, які не призводять до виникнення тріщин та сколів під час випалювання, не перевищує 5–10 % залежно від рівня температури обробки, що є абсолютно прийнятним для виконання інженерних розрахунків.

10. Здійснено вибір пічного обладнання для графітування заготовок ізостатичного графіту. Встановлено, що застосування печей прямого нагрівання Кастнера для графітування заготовок ІГ є доцільним, оскільки печі Кастнера порівняно з печами Ачесона є більш енергоефективними та забезпечують більш рівномірне поле температур у виробі під час термообробки.

11. На підставі аналізу фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час графітування продукції ІГ у печах Кастнера, сформульовано теплоелектричну фізичну модель печі, у якій враховуються теплові ефекти хімічних реакцій, випаровування і конденсації вологи, сублімації графіту, теплоелектрична контактна взаємодія між елементами конструкції печі.

12. Сформульовано математичну модель теплоелектричного стану печі Кастнера в процесі графітування заготовок ІГ, в якій враховуються теплові ефекти реакцій газифікації вуглецевмісного матеріалу, конверсія оксиду вуглецю і водню в теплоізоляційному сипкому матеріалі й тепломасоперенос вологи, сублімація графіту, контактна взаємодія між елементами конструкції теплоелектричної природи. На базі запропонованої математичної моделі розроблено відповідну числову модель теплоелектричного стану печі Кастнера з використанням програмного забезпечення авторської розробки, побудованого на числовому методі скінченних елементів.

13. Верифікація числової моделі теплоелектричного стану печі Кастнера показала узгодження результатів числового моделювання температурних полів з фізичним експериментом у межах 4 % в інтервалі зміни температур до 1600 °С у разі врахування впливу теплових ефектів хімічних реакцій газифікації. В іншому випадку, тобто без врахування теплових ефектів

газифікації, розбіжність між числовими та експериментальними даними становить більше 10 %.

14. Виконані дослідження теплоелектричного стану печі Кастнера необхідні для розробки енергозберігаючих регламентів введення електричної потужності на діючих печах Кастнера, або під час модернізації їх конструкцій для перевірки експлуатаційної придатності, або у разі переходу на графітування нової продукції, наприклад, заготовок ІГ.

15. Досліджено вплив габаритних розмірів заготовок ІГ на технологічні регламенти їх випалювання. Встановлено, що збільшення діаметра заготовок удвічі призводить до зменшення гранично допустимого значення радіального градієнта температур удвічі. При цьому тривалість процесу випалювання збільшується у чотири рази.

16. Виконано дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів на процес прямого графітування заготовок у печах Кастнера. Встановлено, що значне зменшення діаметра кільцевих електроконтактних прокладок призводить до перегріву центральної осьової частини електродних свічок, а збільшення – до високих значень радіальних перепадів температури. Використання кільцевих прокладок з підвищеним електричним опором доцільне лише на кінцях електродних свічок.

17. Проведено дослідження впливу вмісту вологи в теплоізоляційному матеріалі на тепловий стан печі Кастнера. Встановлено, що нестабільність вологості теплоізоляційного матеріалу печі потребує коригування графіка введення електричної енергії в піч для запобігання механічного руйнування заготовок внаслідок високої швидкості їх нагрівання в небезпечному діапазоні температур, що характеризується інтенсивним виділення оксидів сірки, або перевитраті електроенергії.

18. Виконано дослідження впливу габаритних розмірів заготовок ІГ на технологічні регламенти їх графітування. Встановлено, що габаритні розміри заготовок ІГ однозначно впливають на регламент їх графітування, що проявляється на зміні темпу нагрівання заготовок та відповідно на тривалості процесу. Тобто, зі збільшенням габаритних розмірів заготовок ІГ темп їх нагрівання зменшується, що відповідно призводить до збільшення тривалості процесу графітування.

19. Розроблено схему й методику експериментальних досліджень процесу графітування великогабаритних заготовок ізостатичного графіту в печах прямоточного графітування Кастнера.

20. Визначено комплекс фізичних властивостей матеріалу заготовок ІГ на інтервалі зміни температур до 3000 °С, що є необхідним для відпрацювання раціональних регламентів випалювання та графітування, які включають теплові й теплоелектричні розрахунки та розрахунки на міцність.

21. Встановлено, що динаміку інтенсивності газовиділення можна застосовувати для розробки раціональних регламентів випалювання заготовок ІГ у разі відсутності відповідних даних з фізичних властивостей. При цьому мінімальний темп нагрівання заготовок ІГ має відповідати максимуму інтенсивності газовиділення.

22. Виконано експериментальні дослідження інтенсивності газовиділення й ПЕО заготовок ІГ на лабораторній базі НДЦ «РТ» КПП ім. Ігоря Сікорського.

23. Розроблено енергозберігаюче технічне рішення високотемпературного оброблення заготовок ізостатичного графіту, яке полягає в об'єднанні процесів випалювання і графітування. Це дає змогу знизити енергоємність процесу термообробки до 25 % та істотно збільшити продуктивність технології графітованих виробів.

24. Розроблено енергозберігаючий регламент графітування заготовок ІГ діаметром 300 мм у печі Кастнера з метою його реалізації в промислових умовах.

25. Розроблені технічні рішення та результати науково-технічних досліджень впроваджено на електродному виробництві ПрАТ «Укрграфіт» на переділах випалювання і графітування електродних заготовок.

Використання розроблених методик не обмежується можливістю їх застосування для виконання теплогідродинамічних, теплоелектричних та механічних розрахунків під час пресування, випалювання і графітування заготовок ізостатичного графіту під час пресування і в печах з викочуванням подом і Кастнера. Завдяки своїй універсальності, дані розробки можуть бути використані для числового аналізу фізичного стану різноманітного електротермічного обладнання, наприклад, дугових сталеливарних печей тощо.

З використанням одержаних результатів числових експериментів під час зміни конструкцій печей та регламентів введення електричної потужності можна визначати раціональні технічні рішення для розробки нового обладнання або модернізації діючого.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А ВІДНОВЛЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

Розглянемо математичну постановку прямої задачі нелінійної нестационарної теплопровідності для циліндричного шару

$$c_p(t)\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial r} \right], r \in (r_1, r_2), \tau \in (0, T], \quad (\text{A.1})$$

де c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); ρ – густина, кг/м³; t – температура, °С; τ – час, с; r – радіус, м; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); r_1, r_2 – менший і більший радіуси циліндричного шару, відповідно, м; T – тривалість процесу, с.

Початкові умови для $\tau=0$

$$t(r, 0) = t_0(r). \quad (\text{A.2})$$

Граничні умови для $\tau > 0$:

$$\begin{cases} t(r_1, \tau) = t_1(\tau); \\ t(r_2, \tau) = t_2(\tau). \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Рівняння теплопровідності (A.1) у разі його запису через коефіцієнт температуропровідності набуває вигляду

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ra(t) \frac{\partial t}{\partial r} \right], r \in (r_1, r_2), \tau \in (0, T], \quad (\text{A.4})$$

де $a = \lambda/(c_p\rho)$ – коефіцієнт температуропровідності, м²/с.

Для замикання системи рівнянь (A.1)–(A.3) для формулювання оберненої коефіцієнтної задачі теплопровідності (ОКЗТ), що найменше треба додати по одній умові для визначення кожного з невідомих коефіцієнтів λ і c_p (A.1) для $\tau > 0$:

$$\begin{cases} q_E(r_q, \tau) = \frac{q_l(\tau)}{2\pi r_q}; \\ t_E(r_t, \tau) = t_t(\tau), \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

де q – густина теплового потоку, Вт/м²; q_l – лінійна густина теплового потоку, Вт/м; $r_q, r_t \in (r_1, r_2)$ – радіальні координати, в яких визначаються густина теплового потоку й температура всередині циліндричного шару, відповідно, м; E – індекс, який вказує на те, що величини отримані під час фізичного експерименту.

Система рівнянь (A.1)–(A.3), (A.5) є повним математичним формулюванням одновимірної ОКЗТ для циліндричного шару.

Для числового розв'язання ОКЗТ використовуватимемо метод послідовної мінімізації неув'язки [136], який базується на градієнтному методі. Цей метод передбачає екстремальне формулювання задачі, використовуючи функціонали неув'язки у вигляді:

$$\begin{cases} F_q(\lambda) = \frac{1}{2} [q_E(r_q, \tau) - q_M(\lambda, r_q, \tau)]^2; \\ F_t(c_p) = \frac{1}{2} [t_E(r_t, \tau) - t_M(c_p, r_t, \tau)]^2; \end{cases} \quad r_q, r_t \in (r_1, r_2), \tau \in (0, T], \quad (\text{A.6})$$

де M – індекс, що відповідає модельним даним, які описуються (A.1)–(A.3); E – індекс, що відповідає експериментальним даним.

Для отримання виразів для ітераційного знаходження коефіцієнтів ОКЗТ за градієнтним методом послідовної мінімізації неув'язки скористаємося розкладанням функцій $\lambda(q)$ і $c_p(t)$ у ряд Тейлора в околі експериментальних значень q_E і t_E до першого порядку малості:

$$\begin{cases} \lambda(q_E) = \lambda(q_M) + \frac{d\lambda(q_M)}{dq_M} (q_E - q_M); \\ c_p(t_E) = c_p(t_M) + \frac{dc_p(t_M)}{dt_M} (t_E - t_M). \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

Вирази (A.7) також можна отримати за допомогою дослідження функціоналів (A.6) на екстремум $\frac{dF_q(\lambda)}{dq_M} = 0$ і $\frac{dF_t(c_p)}{dt_M} = 0$. Далі після деяких перетворень нескладно отримати співвідношення (A.7).

Метод послідовної мінімізації неув'язки передбачає багатократне розв'язання прямої задачі (A.1)–(A.3) на кожному кроці інтегрування за часом. Тому для числової реалізації цього методу скористаємося добре апробованим методом скінченних різниць (МСР). Для цього виконаємо просторово-часову дискретизацію розрахункової області. Для рівномірної сітки будемо мати:

$$\omega_{h\tau} = \{(r_i, \tau_j)\}, r_i = r_1 + h(i-1), \tau_j = \Delta\tau j, h = \frac{r_2 - r_1}{n-1}, \Delta\tau = \frac{T}{m}. \quad (\text{A.8})$$

До рівняння (A.1) у лінійному його варіанті застосуємо консервативну явно-неявну різницеву схему на шеститочковому шаблоні з другим порядком апроксимації за координатою й часом [137, 138]

$$\begin{aligned} c_p \rho (t_i^{j+1} - t_i^j) \frac{(r_{i+1/2}^2 - r_{i-1/2}^2)}{2\Delta\tau} = \frac{1}{2} \left[r_{i+1/2} \lambda \frac{t_{i+1}^{j+1} - t_i^{j+1}}{h} - r_{i-1/2} \lambda \frac{t_i^{j+1} - t_{i-1}^{j+1}}{h} + \right. \\ \left. + r_{i+1/2} \lambda \frac{t_{i+1}^j - t_i^j}{h} - r_{i-1/2} \lambda \frac{t_i^j - t_{i-1}^j}{h} \right] + O(h^2 + \Delta\tau^2), \quad 2 \leq i \leq n-1, 1 \leq j \leq m, \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

де $r_{i+1/2} = \frac{r_i + r_{i+1}}{2}$, $r_{i-1/2} = \frac{r_i + r_{i-1}}{2}$, м.

Система дискретних рівнянь (А.9) розв'язується методом триточної прогонки [137, 138]. У результаті розв'язання (А.9) на кожному кроці інтегрування за часом отримуємо поле значень температур, за яким визначаються модельні значення густини теплового потоку й температури в реперних точках, відповідно:

$$\begin{cases} q_M(r_q, \tau) = q_k^{j+1} + \frac{q_{k+1}^{j+1} - q_k^{j+1}}{h} (r_q - r_k), r_q \in (r_k, r_{k+1}), q_k^{j+1} = \lambda \frac{t_{k+1}^{j+1} - t_{k-1}^{j+1}}{2h}; \\ t_M(r_t, \tau) = t_i^{j+1} + \frac{t_{i+1}^{j+1} - t_i^{j+1}}{h} (r_t - r_i), r_t \in (r_i, r_{i+1}). \end{cases} \quad (\text{А.10})$$

Після заміни похідних на скінченні різниці в (А.7) отримуємо:

$$\begin{cases} \lambda^{l+1} = \lambda^l + \frac{\lambda^l - \lambda^{l-1}}{q_M^l - q_M^{l-1}} (q_E - q_M^l), \\ c_p^{l+1} = c_p^l + \frac{c_p^l - c_p^{l-1}}{t_M^l - t_M^{l-1}} (t_E - t_M^l), \end{cases} \quad (\text{А.11})$$

де l – номер ітерації із визначення коефіцієнтів рівняння (А.9) на кожному кроці інтегрування за часом.

Критерієм закінчення ітерацій на кожному кроці інтегрування за часом рівняння (А.9) є виконання умови (А.6) у вигляді

$$\begin{cases} |q_E - q_M^l| \leq \delta_q; \\ |t_E - t_M^l| \leq \delta_t, \end{cases} \quad (\text{А.12})$$

де δ_q , δ_t – похибки визначення модельних значень густини теплового потоку й температури, відповідно.

У разі відновлення тільки коефіцієнта температуропровідності формулювання ОКЗТ дещо спрощується і включає рівняння (А.4) разом з початковими і граничними умовами (А.2), (А.3) і однією умовою по температурі в (А.6), яка необхідна для відновлення коефіцієнта температуропровідності на кожному кроці інтегрування за часом (А.4).

При цьому дискретний аналог рівняння (А.4) має вигляд

$$\begin{aligned} (t_i^{j+1} - t_i^j) \frac{(r_{i+1/2}^2 - r_{i-1/2}^2)}{2\Delta\tau} = \frac{1}{2} \left[r_{i+1/2} a \frac{t_{i+1}^{j+1} - t_i^{j+1}}{h} - r_{i-1/2} a \frac{t_i^{j+1} - t_{i-1}^{j+1}}{h} + \right. \\ \left. + r_{i+1/2} a \frac{t_{i+1}^j - t_i^j}{h} - r_{i-1/2} a \frac{t_i^j - t_{i-1}^j}{h} \right] + O(h^2 + \Delta\tau^2), \quad 2 \leq i \leq n-1, 1 \leq j \leq m, \end{aligned} \quad (\text{А.13})$$

а співвідношення (А.11) набуває вигляду

$$a^{l+1} = a^l + \frac{a^l - a^{l-1}}{t_M^l - t_M^{l-1}} (t_E - t_M^l). \quad (\text{A.14})$$

Алгоритм розв'язання ОКЗТ методом послідовної мінімізації неув'язки у разі відновлення двох коефіцієнтів є таким. За початковий розподіл температури береться стаціонарне поле. Задаються початкові значення коефіцієнтів теплопровідності і теплоємності. На кожному часовому рівні розглядаються цикл мінімізації неув'язки, в якому спочатку розв'язується пряма задача (А.9), далі виконується певний приріст значення коефіцієнтів і знову розв'язується пряма задача за нових значень коефіцієнтів. Потім розраховуються нові значення коефіцієнтів за (А.11), розв'язується пряма задача (А.9) і виконується перевірка збіжності за (А.12). Цикл продовжується до виконання нерівності (А.12). Далі відбувається перехід на новий часовий рівень і цикл визначення коефіцієнтів повторюється. У разі відновлення тільки одного коефіцієнта (температуропровідності) алгоритм є майже аналогічним. Різниця полягає лише у формі рівняння прямої задачі (А.13), для визначення нового значення коефіцієнта температуропровідності використовується (А.14) і перевірка збіжності виконується тільки за температурою в (А.12).

Для розв'язання ОКЗТ використовувалися експериментальні дані, що були отримані на установці, яка побудована на квазістаціонарному методі циліндричного шару [135, 139] і в якій рівень температури забезпечувався фоновими нагрівниками, а перепад температури і вихід на квазістаціонарний режим – центральним нагрівником (рис. А.1). При цьому для виконання розрахунків використовувалася тільки квазістаціонарна ділянка розігріву матеріалу. Під час експериментів, окрім граничних температур циліндричного шару, також визначалася температура в середині шару й густина теплового потоку крізь шар.

Для числової реалізації наведеної методики розв'язання ОКЗТ застосовано програмне середовище Mathcad [140, 141].

Для тестування розглянутої методики розв'язання ОКЗТ використані експериментальні дані [135, 139], які були проведені на сипкому матеріалі – кам'яновугільному сирому коксі гранулометричним складом 0–10 мм і насипною густиною 600 кг/м³. Параметри експериментальної комірки методу коаксіальних циліндрів були такими: $d_1=26$ мм, $d_2=70$ мм – внутрішній та зовнішній діаметри циліндричного шару, відповідно; $d_3 = \sqrt{d_1 d_2}$ – діаметр, за якого контролювалася температура всередині циліндричного шару; $q_l = UI/l$ – лінійна густина теплового потоку крізь циліндричний шар, Вт/м; U – різниця потенціалу на центральному нагрівнику, В; I – сила струму на центральному нагрівнику, А/м²; l – довжина центрального нагрівника, м.

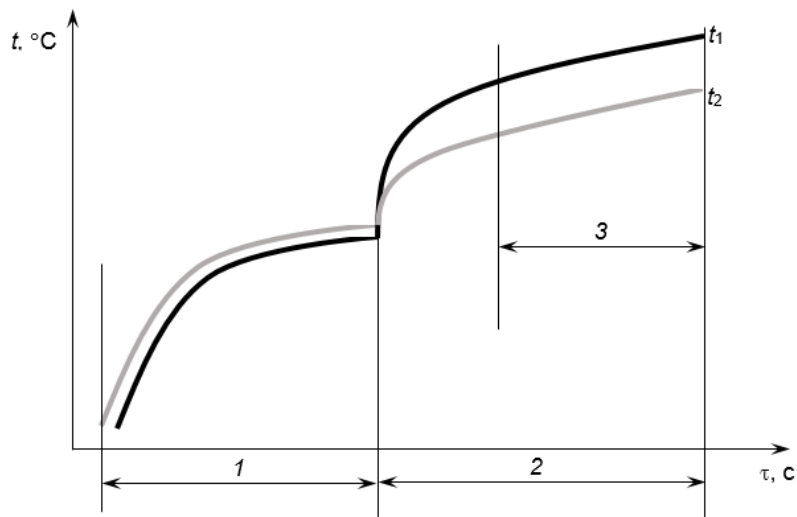


Рис. А.1. Схема зміни температури на границях циліндричного шару в експериментальній установці: 1 – ділянка нагрівання фоновим нагрівником; 2 – ділянка нагрівання центральним нагрівником; 3 – ділянка квазістаціонарного режиму нагрівання; t_1, t_2 – температури внутрішньої і зовнішньої сторін циліндричного шару, відповідно

Для розрахунків обрано три ділянки із квазістаціонарним режимом нагрівання циліндричного шару (рис. А.2) в інтервалі зміни температур 730–950 $^{\circ}\text{C}$. Рівень температур вищий за 730 $^{\circ}\text{C}$ був вибраний для того, щоб мінімізувати вплив летючих на результати досліджень.

Порядок розрахунків теплофізичних властивостей на кожній квазістаціонарній ділянці був такий. Спочатку виконується згладжування експериментальних даних (див. рис. А.2), або за допомогою регуляризації за Тихоновим [137], або апроксимації поліномами, або функціями Mathcad [140], наприклад, такими як `supsmooth()`, `ksmooth()`. Далі задаються геометричні параметри циліндричного шару, виконується дискретизація розрахункової області за (А.8), визначається початкове значення розподілу температури із розв'язання стаціонарної задачі типу (А.9) (коли $c_p = 0$) з використанням експериментальних значень t_1, t_2 (див. рис. А.2) у початковий момент часу й задаються початкові значення теплофізичних коефіцієнтів і похибки визначення модельних значень густини теплового потоку й температури для (А.12). Потім на кожному кроці інтегрування за часом розв'язується ОКЗТ за допомогою розв'язання прямої задачі (А.9) в ітераційному циклі з уточненням значень коефіцієнтів (А.11). При цьому критерієм закінчення ітерацій на кожному кроці інтегрування за часом є виконання умови (А.12). Після проведення розрахунків на кожній ділянці квазістаціонарній визначаються середня температура ділянки й відповідні середні значення відновлених коефіцієнтів. При цьому перші три кроки за часом відкидаються, тобто не приймають участь в осередненні.

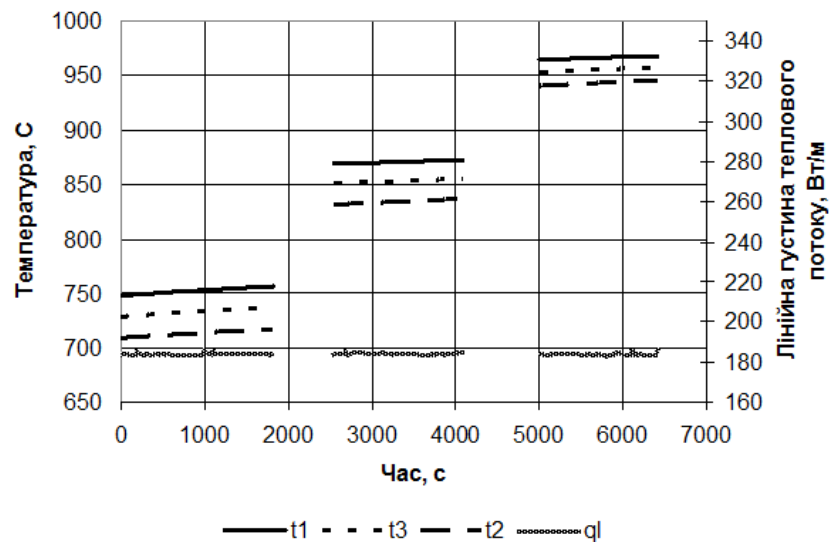


Рис. А.2. Експериментальні дані трьох ділянок із квазістаціонарним режимом нагрівання циліндричного шару сипкого матеріалу [135, 139]

У разі відновлення тільки значення коефіцієнта теплопровідності замість прямої задачі (А.9) розв'язується задача (А.13) з уточненням шуканого коефіцієнту за (А.14) і перевіркою збіжності тільки за температурою в (А.12). Результати тестування запропонованої методики на даних (див. рис. А.2) та їх порівнянням з експериментом наведено на рис. А.3.

Аналіз отриманих даних (рис. А.3) підтверджує працездатність запропонованої методики, оскільки похибка визначення коефіцієнта теплопровідності становить 0,46 %, а масової ізобарної теплоємності – 1,63–10,77 %, що є абсолютно прийнятним достатнім для їх використання в інженерних розрахунках промислового обладнання.

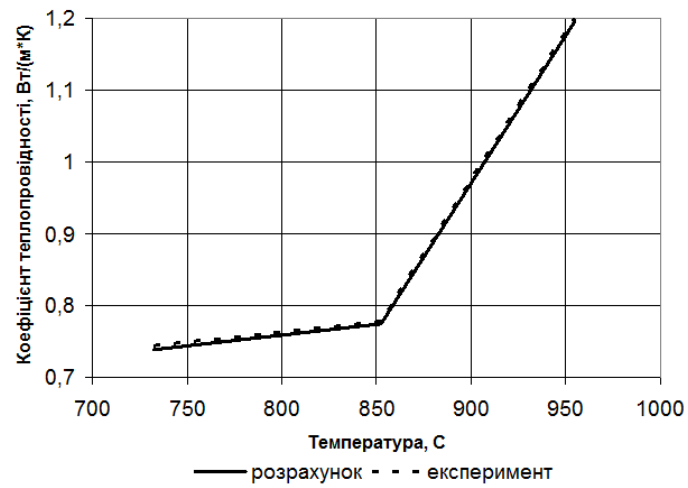
Порівняння відновленого значення коефіцієнта теплопровідності (див. рис. А.3,в) виконувалося з використанням формули $a = \lambda / (c_p \rho)$, де λ і c_p є відновленими значеннями під час їх спільного визначення (див. рис. А.3,в,б). Розбіжність між цими даними не перевищує 3 %.

За результатами викладеного можна зробити такі висновки:

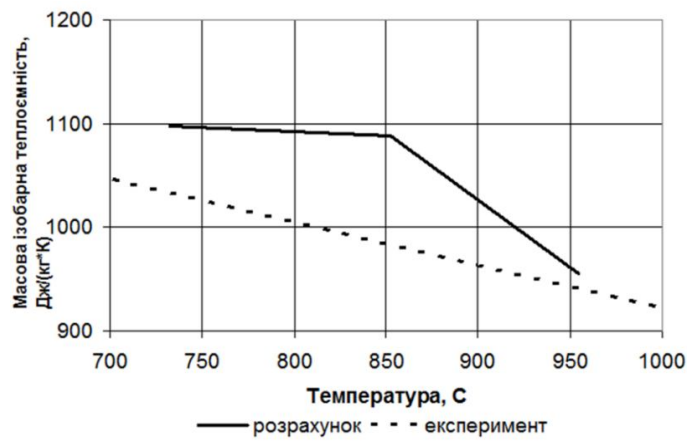
1. Розглянута екстремальна постановка й методика числового розв'язання ОКЗТ з використанням градієнтного методу для одночасного відновлення λ і c_p , або тільки коефіцієнта теплопровідності. Розроблено відповідне програмне забезпечення у середовищі Mathcad [140].

2. Виконано тестування розробленої методики на експериментальних даних [135, 139]. Проведено порівняння відновлених значень теплофізичних коефіцієнтів з експериментом.

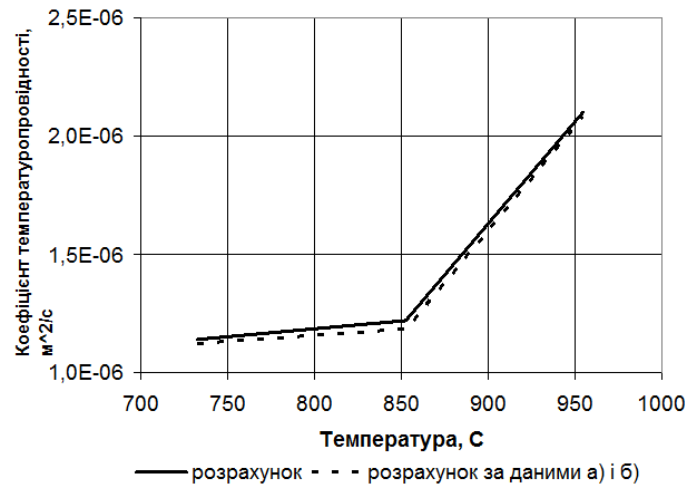
3. Похибка визначення теплофізичних властивостей сипких матеріалів за допомогою розв'язання ОКЗТ не перевищує для коефіцієнта теплопровідності 0,46 % і масової ізобарної теплоємності (1,63–10,77) %, що є абсолютно прийнятним для їх використання в інженерних розрахунках промислового обладнання.



a



б



в

Рис. А.3. Результати розв'язання ОКЗТ: *a* – коефіцієнт теплопровідності (порівняння з [135, 139]); *б* – масова ізобарна теплоємність (порівняння з [142]); *в* – коефіцієнт температуропровідності (порівняння з $a = \lambda / (c_p \rho)$)

ДОДАТОК Б

НЕЯВНИЙ АЛГОРИТМ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ПРУЖНО- ПЛАСТИЧНОСТІ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛІ ДРУКЕРА–ПРАГЕРА

Згідно з інкрементальною теорією пластичності математична модель пружно-пластичної поведінки ізотропного сипкого матеріалу включає рівняння рівноваги, узагальнений закон Гука та геометричне рівняння та, записаних через приріст у тензорній формі [143, 144]:

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_{ij,j} + \rho \dot{b}_i = 0; \\ \dot{\sigma}_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(\dot{\epsilon}_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \dot{\epsilon}_{kk} \right) - \dot{\sigma}_{ij}^0; \quad i, j = 1, 2, 3, \\ \dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i}) = \dot{\epsilon}_{ij}^{el} + \dot{\epsilon}_{ij}^{pl}, \end{cases} \quad (\text{Б.1})$$

де $\dot{\sigma}_{ij}$ – компоненти симетричного тензора приросту напруження 2-го рангу, Па; ρ – густина, кг/м³; \dot{b}_i – компоненти вектора приросту масових сил, наприклад, гравітаційних, Н/кг; E – модуль пружності під час одновісного стискання, Па; ν – коефіцієнт Пуассона; δ_{ij} – символ Кронекера; $\dot{\sigma}_{ij}^0$ – компоненти тензора приросту початкового напруження, Па; $\dot{\epsilon}_{ij}^{el}, \dot{\epsilon}_{ij}^{pl}$ – пружна і пластична складові тензора приросту повних деформацій $\dot{\epsilon}_{ij}$, відповідно; \dot{u}_i – компоненти вектора приросту переміщення, м.

У разі використання критерію настання стану пластичності Друкера–Прагера умова текучості сипкого матеріалу (функція пластичності) записується таким чином [143, 144]

$$F(\sigma_{ij}, c, \varphi) = \sigma_{eqDP} - \sigma_y(c, \varphi), \quad (\text{Б.2})$$

де F – функція поверхні текучості сипкого матеріалу;

$\sigma_{eqDP} = 3\alpha(\varphi)\sigma_m + \sqrt{\frac{1}{2}s_{ij}s_{ij}}$ – еквівалентне напруження за Дукером–Прагером,

Па; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\sigma_{kk}$ – компоненти тензора девіаторних напружень, Па;

$\sigma_m = \frac{1}{3}\delta_{ij}\sigma_{kk}$, Па; $\sigma_y(c, \varphi)$ – границя текучості сипкого матеріалу, Па; c – сила

зчеплення між гранулами сипкого матеріалу, Па; φ – кут внутрішнього тертя або кут природного укосу сипкого матеріалу, рад.

Якщо припустити, що поверхня плинності Друкера–Прагера огинає поверхню плинності Мора-Кулона [143, 144] то вирази для $\sigma_y(c, \varphi)$ і $\alpha(\varphi)$ набувають вигляду:

$$\sigma_y(c, \varphi) = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}, \quad \alpha(\varphi) = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}. \quad (\text{Б.3})$$

Початкові умови для (Б.1), (Б.2):

$$\dot{\sigma}_{ij}^0 = 0, i, j = 1, 2, 3. \quad (\text{Б.4})$$

Граничні умови для (Б.1), (Б.2):
– приріст вектора переміщення

$$\dot{u}_i|_{S_u} = 0, i = 1, 2, 3, \quad (\text{Б.5})$$

де S_u – поверхня (або точка поверхні), на якій задано переміщення, м^2 ;
– симетрії

$$n_i \dot{u}_i|_{S_{su}} = 0, i = 1, 2, 3, \quad (\text{Б.6})$$

де n_i – компоненти вектора зовнішньої нормалі до поверхні тіла; S_{su} – поверхня симетрії тіла, м^2 .

Розглянемо основні теоретичні положення неявного алгоритму оберненого відображення (Return-mapping Algorithms) [143, 144]. Істинні пружні напруження у разі виникнення пружно-пластичних деформацій у сипкому матеріалі визначаються співвідношенням

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\varepsilon_{kl}^{tr} - \varepsilon_{kl}^{pl}), \quad (\text{Б.7})$$

де σ_{ij} – компоненти тензора напруження 2-го рангу, Па; C_{ijkl} – компоненти тензора четвертого рангу пружних констант матеріалу, Па; ε_{kl}^{tr} – компоненти тензора пробних (повних) деформацій 2-го рангу, що визначається в наближенні пружного середовища; $\varepsilon_{kl}^{pl} = \sum_{i=1}^N (\Delta \varepsilon_{kl}^{pl})_i$ – компоненти тензора пластичних деформацій 2-го рангу; $\Delta \varepsilon_{kl}^{pl}$ – компоненти тензора приросту пластичної деформації на i -у кроці навантаження; N – кількість кроків навантаження.

У разі використання неасоціативного закону пластичної течії, коли $\alpha \neq \beta$, маємо

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{pl} = \Delta \varepsilon_{ij}^{pl} = \Delta \lambda m_{ij}, \text{ або } \dot{\hat{\varepsilon}}^{pl} = \Delta \hat{\varepsilon}^{pl} = \Delta \lambda \hat{\mathbf{m}}, \quad (\text{Б.8})$$

де $\beta(\gamma) = \frac{2 \sin \gamma}{\sqrt{3}(3 - \sin \gamma)}$; γ – кут дилатансії, рад; $\hat{\mathbf{m}} = \frac{\partial G}{\partial \hat{\boldsymbol{\sigma}}}$.

Потенційна функція критерію плинності Друкера–Прагера виражається співвідношенням [143]

$$G = 3\beta(\gamma)\sigma_m + \sqrt{\frac{1}{2}s_{ij}s_{ij}} + \text{const}. \quad (\text{Б.9})$$

Скалярний асоціативний множник $\Delta \lambda$ або коефіцієнт пластичності (Б.8) у разі відсутності зміцнення визначається за формулою

$$\Delta \lambda = \frac{n_{ij} C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^{tr}}{n_{ij} C_{ijkl} m_{kl}} \text{ або } \Delta \lambda = \frac{\hat{\mathbf{n}} : \hat{\dot{\mathbf{C}}} : \hat{\varepsilon}^{tr}}{\hat{\mathbf{n}} : \hat{\dot{\mathbf{C}}} : \hat{\mathbf{m}}^T}, \quad (\text{Б.10})$$

$$\text{де } \hat{\mathbf{n}} = \frac{\partial F}{\partial \hat{\boldsymbol{\sigma}}} = \alpha \hat{\mathbf{I}} + \frac{1}{2} \frac{\hat{\mathbf{s}}}{\sqrt{\frac{1}{2} \hat{\mathbf{s}} : \hat{\mathbf{s}}}} \quad \text{і} \quad \hat{\mathbf{m}} = \frac{\partial G}{\partial \hat{\boldsymbol{\sigma}}} = \beta \hat{\mathbf{I}} + \frac{1}{2} \frac{\hat{\mathbf{s}}}{\sqrt{\frac{1}{2} \hat{\mathbf{s}} : \hat{\mathbf{s}}}} - \text{тензори 2-го рангу, які є}$$

похідними від функцій (Б.2) і (Б.9) за тензором напруження, відповідно; $\hat{\mathbf{C}}^4$ – тензор пружних констант 4-го рангу, Па; $\hat{\mathbf{I}}$ – одиничний тензор 2-го рангу; $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{tr}$ – тензор пробних пружних деформацій на кожному кроці навантаження.

З врахуванням (Б.8) і (Б.10) формулу (Б.7) для $k+1$ кроку навантаження можна переписати у вигляді

$$\sigma_{ij}^{k+1} = \sigma_{ij}^{tr} - \Delta\lambda^{k+1} C_{ijkl} m_{ij}(\sigma_{ij}^{k+1}) \quad \text{або} \quad \hat{\boldsymbol{\sigma}}^{k+1} = \hat{\boldsymbol{\sigma}}^{tr} - \Delta\lambda^{k+1} \hat{\mathbf{C}}^4 : \hat{\mathbf{m}}(\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{k+1}), \quad (\text{Б.11})$$

де $\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{tr} = \hat{\mathbf{C}}^4 : \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{tr}$ – тензор пробних напружень, що визначається в наближенні пружного середовища, Па.

Формула (Б.11) дає відображення тензора пробного напруження $\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{tr}$ у напрямку поверхні текучості. Тому цей метод інтегрування, який побудовано на оберненому методі Ейлера, дістав назву алгоритму оберненого відображення [143, 144].

Система рівнянь (Б.11) з врахуванням симетрії тензора напруження має сім невідомих, а саме шість незалежних компонент $\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{tr}$ і $\Delta\lambda$. Тому для однозначності системи рівнянь (Б.11) її треба доповнити скалярним рівнянням (Б.2) у вигляді вимоги про те, що умова плинності дотримується в кінці стадії навантаження

$$F(\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{k+1}, \Delta\lambda) = 0. \quad (\text{Б.12})$$

Нелінійну систему рівнянь (Б.11), (Б.12) можна переписати у форматі неув'язок. При цьому необхідно виконати перехід на шестивимірний простір з врахуванням симетрії тензорів напруження і деформації. Це дає змогу замінити тензори 2-го рангу $\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{k+1}$, $\hat{\boldsymbol{\sigma}}^{tr}$, $\hat{\mathbf{n}}$, $\hat{\mathbf{m}}$ на відповідні вектори $\boldsymbol{\sigma}^{k+1}$, $\boldsymbol{\sigma}^{tr}$, \mathbf{n} , \mathbf{m} з шістьма компонентами та замість тензора 4-го рангу $\hat{\mathbf{C}}^4$ використовувати тензор другого рангу пружних констант \mathbf{D}^{el} розмірністю 6×6 :

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma}^{k+1} - \boldsymbol{\sigma}^{tr} + \Delta\lambda^{k+1} \mathbf{D}^{el} \cdot \mathbf{m}(\boldsymbol{\sigma}^{k+1}); \\ r_F = F(\boldsymbol{\sigma}^{k+1}, \Delta\lambda^{k+1}). \end{cases} \quad (\text{Б.13})$$

Для розв'язання системи нелінійних рівнянь (Б.13) зазвичай використовується метод Ньютона, ітераційна процедура якого записується таким чином:

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{\sigma}_{j+1}^{k+1} \\ \Delta\lambda_{j+1}^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\sigma}_j^{k+1} \\ \Delta\lambda_j^{k+1} \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{r}_{\boldsymbol{\sigma}}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} & \frac{\partial \mathbf{r}_{\boldsymbol{\sigma}}}{\partial \Delta\lambda} \\ \frac{\partial r_F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} & \frac{\partial r_F}{\partial \Delta\lambda} \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{r}_{\boldsymbol{\sigma}}^j \\ \mathbf{r}_F^j \end{pmatrix}, \quad (\text{Б.14})$$

де $\frac{\partial \mathbf{r}_\sigma}{\partial \sigma} = \hat{\mathbf{I}} + \Delta \lambda_j^{k+1} \hat{\mathbf{D}}^{el} \cdot \frac{\partial \mathbf{m}(\sigma_j^{k+1})}{\partial \sigma}$; $\frac{\partial \mathbf{r}_\sigma}{\partial \Delta \lambda} = \hat{\mathbf{D}}^{el} \cdot \mathbf{m}(\sigma_j^{k+1})$; $\frac{\partial r_F}{\partial \sigma} = \mathbf{n}^T(\sigma_j^{k+1})$; $\frac{\partial r_F}{\partial \Delta \lambda} = 0$. Тут індекс k відноситься до кроку навантаження, а індекс j до номеру ітерації за методом Ньютона.

На кожному кроці ітерацій за методом Ньютона (Б.14) доцільно не знаходити обернену матрицю, а розв'язувати систему лінійних алгебричних рівнянь (СЛАР) методом виключення Гауса, що дає змогу значно зменшити кількість арифметичних операцій, приблизно на $3n^2$ в кожному пластичному скінченному елементі, де n – розмірність СЛАР.

Для $k=1$ розв'язується звичайна пружна задача відносно повних переміщень за умови задання граничних умов (Б.4)–(Б.6), за якими визначаються пробні напруження. Далі в частині шару сипкого матеріалу, що знаходиться в пружно-пластичному стані, визначаються приріст пластичної деформації і тензор пружного напруження із розв'язку (Б.14) і знаходяться початкові напруження за формулою $\sigma^{0(k=1)} = \Delta \lambda^{(k=1)} \mathbf{D}^{el} \cdot \mathbf{m}^{(k=1)}$.

Наступні кроки інтегрування (Б.1), (Б.2) для $k > 1$ виконуються тільки з навантаженням початковими напруженнями за граничних умов (Б.4). При цьому також розв'язуються пружна задача і визначаються прирости переміщень $\Delta \mathbf{u}^k$, уточнюються значення повних переміщень, за якими знаходяться нові пробні напруження, та із розв'язку (Б.14) нове значення приросту пластичної деформації й тензора пружного напруження для частини тіла, що знаходиться в пружно-пластичному стані. Далі визначають приріст початкових напружень $\sigma^{0(k)} = \Delta \lambda^k \mathbf{D}^{el} \cdot \mathbf{m}^k - \sigma^{0(k-1)}$ для виконання наступного кроку навантаження. Критерієм закінчення розрахунків може бути, наприклад, виконання умови $|\Delta \mathbf{u}^k| \leq \delta_u$ або $|\varepsilon_{eq}^{pl(k)}| \leq \delta_\varepsilon$.

Нові пробні напруження $\sigma^{tr(k)}$ в алгоритмі розв'язання задачі також можна визначати через попередні їх значення $\sigma^{tr(k-1)}$ і приріст пружних деформацій $\Delta \varepsilon^k$, що знаходяться через $\Delta \mathbf{u}^k$, за формулою

$$\sigma^{tr(k)} = \sigma^{tr(k-1)} + \mathbf{D}^{el} : \Delta \varepsilon^k(\Delta \mathbf{u}^k). \quad (\text{Б.15})$$

Для визначення $\Delta \mathbf{u}^k$ на кожному кроці інтегрування за часом використовується приріст початкових напружень у формі

$$\sigma^{0(k-1)} = \Delta \lambda^{k-1} \mathbf{D}^{el} \cdot \mathbf{n}^{k-1}. \quad (\text{Б.16})$$

Сумарні пластичні деформації визначаються за формулою

$$\varepsilon^{pl(k)} = \varepsilon^{pl(k-1)} + \Delta \lambda^k \mathbf{n}^k. \quad (\text{Б.17})$$

У разі асоціативного закону пластичної течії, коли $\alpha = \beta(\gamma = \varphi)$, тобто функції плинності F (Б.2) і G (Б.9) збігаються між собою і відповідно $\mathbf{m} = \mathbf{n}$, а напрям приросту пластичної деформації під час течії стає нормальним до поверхні текучості. При цьому у формулах (Б.6)–(Б.12) треба виконати заміну \mathbf{m} на \mathbf{n} . Тобто задача дещо спрощується. Подальший алгоритм розв'язання задачі з асоціативним законом течії такий самий як і у разі неасоціативного.

Для числової реалізації наведеного алгоритму використано метод скінченних елементів і мову програмування високого рівня Compaq Visual Fortran [145]. При цьому глобальна матриця СЛАР формується у стрічковому вигляді і СЛАР розв'язується методом Гауса з врахуванням її стрічкової структури. Побудову тетраедної сітки виконано в САД-системі Gmsh [123] для генерації сіток. Тестування розробленого програмного коду для розв'язання задачі пружно-пластичності сипкого матеріалу виконано на прикладі модельного матеріалу, що характеризується асоціативним законом течії, за різних значень кута природного укосу.

Тест. Задача пружно-пластичності сипкого матеріалу з використанням класичної моделі Друкера–Прагера. Розрахункова область тривимірний $\frac{1}{4}$ конуса з радіусом $r = \sqrt{x^2 + y^2} = 0,34$ м і висотою $z=0,3$ м. Фізичні властивості сипкого матеріалу: насипна густина – $\rho = 800$ кг/м³, модуль пружності – $E = 4000$ Па, коефіцієнт Пуассона – $\nu = 0,45$, сила зчеплення між гранулами сипкого матеріалу – $c = 400$ Па, кут природного укосу $\phi = 15, 10, 5^\circ$. Навантаження – гравітація $g_z = -9,81$ м/с². Закон течії асоціативний $\beta = \alpha$. Граничні умови: закріплення на площині xOy – $u_{z=0} = 0$, симетрія на площинах – xOz і yOz . Тобто умови задачі та її розв'язок відповідає двовимірній вісесиметричній задачі.

Результати розв'язання задачі та їх порівняння з даними отриманими за допомогою програмного продукту ANSYS Mechanical APDL [146] для вісесиметричної геометрії наведено в табл. Б.1.

Результати числового моделювання задачі пластичності сипкого матеріалу з використанням розробленого програмного забезпечення наведено на рис. Б.1.

Для візуалізації результатів розрахунків застосовано відкритий графічний пакет для інтерактивної візуалізації ParaView [147].

Аналіз порівняння результатів показав, що дані моделювання за розробленим програмним забезпеченням збігаються з числовими розв'язками, які були отримані з використанням комерційного програмного забезпечення ANSYS Mechanical APDL [146]. При цьому максимальне значення похибки для таких величин як u_s , σ_{eqM} , ε_{eqM}^{el} і σ_m лежить у межах 0,25–1,71 %, а для ε_{eqM}^{pl} становить 2,1–5,3 %, що є абсолютно прийнятним для виконання інженерних розрахунків.

У результаті апробації модифікованого алгоритму розв'язання задачі (Б.1)–(Б.7) встановлено, що:

- розв'язання лінеаризованої системи рівнянь (Б.14) на кожному кроці ітерацій з використанням методу Гауса замість визначення оберненої матриці дає змогу зменшити кількість арифметичних операцій приблизно на $3n^2$ для кожного пластичного скінченного елемента;

- результати розв'язання задачі з початковими напруженнями через абсолютні значення переміщень за (Б.15), (Б.16) збігаються з результатами, отриманими через приріст переміщень за залежностями (Б.17)–(Б.19) за умов тестової задачі.

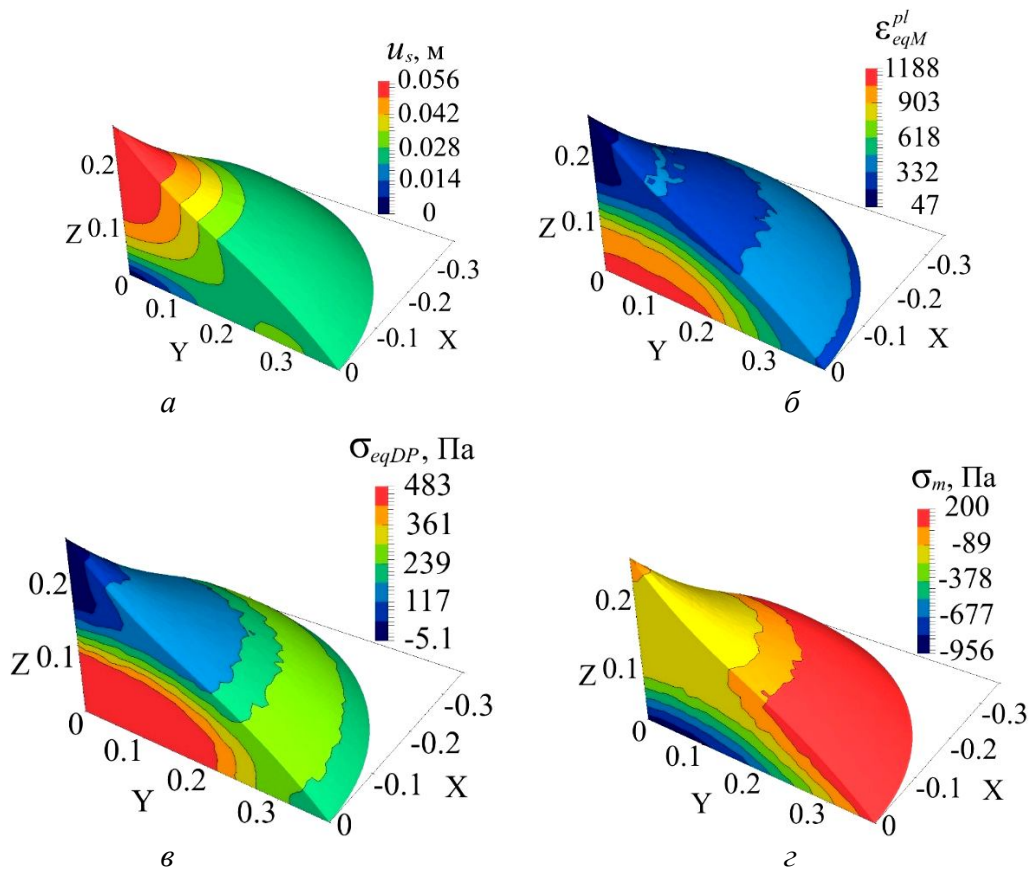


Рис. Б.1. Результати числового моделювання задачі пластичності сипкого матеріалу:
 а – сумарні переміщення; б – еквівалентні пластичні деформації за Мізесом;
 в – еквівалентні напруження за Друкером–Прагером; г – гідростатичний тиск

До переваг роботи можна віднести:

- наведено всі етапи розв’язання задачі від математичного формулювання, методики розв’язання до числової реалізації та верифікації, що є суттєвою методичною перевагою порівняно з [143, 144];

- модифікація алгоритму оберненого відображення.

До недоліків роботи можна віднести:

- дослідження виконано тільки для класичної моделі Друкера–Прагера з асоціативним законом течії;

- програмне забезпечення розраховано лише на використання лінійних тетраедричних скінченних елементів;

- відсутність порівняння результатів числового моделювання з експериментом та даними, отриманими за допомогою програмного пакету ABAQUS.

Результати дослідження є корисними під час числового аналізу фізичних полів електротермічного обладнання, в якому застосовуються сипкі матеріали і є продовженням попередніх досліджень [118, 101].

За результатами викладеного можна зробити такі висновки:

1. На підставі класичної моделі Друкера–Прагера, сформульовано математичну постановку задачі пружно-пластичної поведінки ізотропного сипкого матеріалу.

2. Вдосконалено методику числового розв’язання задачі механічного стану сипкого матеріалу з використанням алгоритму оберненого відображення.

Модифікована методика дає можливість зменшити кількість арифметичних операцій приблизно на $3n^2$ (n – розмірність СЛАР) на кожному кроці ітерацій для кожного пластичного скінченного елемента.

3. Виконано тестування програмного коду на прикладі модельного матеріалу, що характеризується асоціативним законом течії, за різних значень кута природного укосу. Встановлено, що максимальне значення похибки для таких величин як u_s , σ_{eqM} , ε_{eqM}^{el} і σ_m лежить у межах (0,25–1,71) %, а для ε_{eqM}^{pl} становить (2,1–5,3) %.

Таблиця Б.1. Результати порівняння розв’язків задачі пластичності сипкого матеріалу

Тип розв’язку	u_s , м	σ_{eqM} , Па	σ_{eqDP} , Па	ε_{eqM}^{el}	ε_{eqM}^{pl}	σ_m , Па
$\varphi = 5^\circ$, $\sigma_y = 473,89$ Па						
ANSYS 2D axisymmetric, $N=630$, $El=1148$	0–0,070368	27,735–1000,69	–	0,0106–0,250173	0–0,370229	-1002,03–259,964
Наші дані, Fortran 3D, $N=3608$, $El=14641$	0–0,068858	35,234–1001,57	473,89	0,0088–0,250132	0–0,362502	-1006,91–284,346
Різниця, %	2,15	-0,09	–	0,02	2,09	-0,49
$\varphi = 10^\circ$, $\sigma_y = 482,81$ Па						
ANSYS 2D axisymmetric, $N=630$, $El=1148$	0–0,05676	7,409–1182,76	–	0,007733–0,29569	0–0,16233	-939,98–177,104
Наші дані, Fortran 3D, $N=3608$, $El=14641$	0–0,056065	47,0435–1188,7	482,81	0,01176–0,296441	0–0,167898	-956,098–199,596
Різниця, %	1,22	-0,50	–	-0,25	-3,43	-1,71
$\varphi = 15^\circ$, $\sigma_y = 488,27$ Па						
ANSYS 2D axisymmetric, $N=630$, $El=1148$	0–0,051986	0,7–1342,2	–	0,007514–0,335525	0–0,05423	-876,238–151,593
Наші дані, Fortran 3D, $N=3608$, $El=14641$	0–0,051518	37,94–1347,83	488,27	0,009485–0,336254	0–0,05709	-886,353–181,923
Різниця, %	0,90	-0,42	–	-0,22	-5,27	-1,23

Примітка: N – кількість вузлів; El – кількість скінченних трикутних або тетраедричних елементів; u_s – результуюче переміщення, м; σ_{eqM} – еквівалентне напруження за Мізесом, Па; σ_{eqDP} – еквівалентне напруження за Друкером–Прагером, Па; ε_{eqM}^{el} – еквівалентна пружна деформація за Мізесом; ε_{eqM}^{pl} – еквівалентна пластична деформація за Мізесом; σ_m – гідростатичний тиск, Па; φ – кут природного укосу, град.; σ_y – границя текучості матеріалу, Па.

ДОДАТОК В

МЕТОДИКА ЧИСЛОВОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ТЕПЛОЕЛЕКТРИЧНОЇ ЗАДАЧІ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЇЇ ТЕСТУВАННЯ

В.1. Постановка задачі

Систему рівнянь зв'язаної нелінійної нестационарної задачі тепло-електропровідності ізотропного середовища можна записати у вигляді

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial \tau} = \nabla \cdot [\lambda(T) \nabla T(\mathbf{x})] + \chi(T) |\nabla U|^2 + q_v(T), \tau > 0; \\ \nabla \cdot [\chi(T) \nabla U] = 0, \end{cases} \quad \mathbf{x} \in \Omega \quad (B.1)$$

де $h(T) = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p(T) \rho(T) dT$ – об'ємна ентальпія, Дж/м³; T_{ref} – абсолютна температура відліку, К; c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); ρ – густина, кг/м³; T – абсолютна температура, К; τ – час, с; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x_i}$, $i=1,2,3$ – оператор Гамільтона, м⁻¹; x_i , $i=1,2,3$ – декартові координати, м; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); \mathbf{x} – радіус-вектор декартової системи координат, м; χ – коефіцієнт електропровідності, См/м; U – електричний потенціал, В; q_v – об'ємна густина внутрішнього джерела теплоти неелектричної природи, Вт/м³; $\Omega \in R^3$ – тривимірна розрахункова область.

Початкові умови для (B.1) в момент часу $\tau=0$ задаються тільки для нестационарного рівняння теплопровідності

$$T(\mathbf{x})|_{\Omega} = T_0, \quad (B.2)$$

де T_0 – початкова температура, К.

Граничні умови (ГУ) для рівняння теплопровідності (B.1) в момент часу $\tau > 0$ можуть включати ГУ трьох родів:

– I роду або Дирихле – задана температура T_b на границі Γ_{T_I} частини поверхні Ω

$$T(\mathbf{x})|_{\Gamma_{T_I}} = T_b; \quad (B.3)$$

– II роду або Неймана – задана нормальна складова вектора густини теплового потоку на границі $\Gamma_{T_{II}}$ частини поверхні Ω

$$q_n|_{\Gamma_{T_{II}}} = \mathbf{n} \cdot [-\lambda(T) \nabla T] \quad (B.4)$$

де q_n – нормальна складова вектора густини теплового потоку $\mathbf{q} = -\lambda(T) \nabla T$, Вт/м²; \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до Ω ;

– III роду – задані конвективні умови теплообміну на границі $\Gamma_{T\text{ III}}$ частини поверхні Ω

$$\mathbf{n} \cdot [-\lambda(T) \nabla T]_{\Gamma_{T\text{ III}}} = \alpha(T)(T - T_p), \quad (\text{B.5})$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_p – температура оточуючого середовища, К.

ГУ квазістаціонарного рівняння електропровідності (B.1) в момент часу $\tau > 0$ можуть включати ГУ двох типів:

– Дирихле – задано нульовий електричний потенціал на границі $\Gamma_{U\text{ I}}$ частини поверхні Ω

$$U(\mathbf{x})|_{\Gamma_{U\text{ I}}} = 0; \quad (\text{B.6})$$

– Неймана – задана нормальна складова вектора густини електричного струму на границі $\Gamma_{U\text{ II}}$ частини поверхні Ω

$$j_n|_{\Gamma_{U\text{ II}}} = \mathbf{n} \cdot [-\chi(T) \nabla U], \quad (\text{B.7})$$

де j_n – нормальна складова вектора густини електричного струму, А/м².

Система рівнянь (B.1)–(B.7) є повним формулюванням зв’язаної нелінійної нестационарної задачі тепло-електропровідності ізотропного середовища.

В.2. Методика числового розв’язання

Розглянемо числову методику розв’язання задачі (B.1)–(B.7) з використанням методу МСЕ [148–150]. Систему дискретних рівнянь МСЕ можна отримати методом Гальоркіна. При цьому за вагову функцію обирається функція форми скінченного елемента (СЕ). Отже, для задачі (B.1)–(B.7) після дискретизації Ω на скінченні елементи й використання першого порядку апроксимації $O(\Delta\tau)$ для скінченно-різницевого аналога похідної за часом [151], отримуємо таку систему дискретних рівнянь МСЕ у разі її формування по СЕ

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{e=1}^M \left\{ -[C^{(e)}] \frac{\{\hat{h}^{(e)}\} - \{h^{(e)}\}}{\Delta\tau} - \left[[K_\lambda^{(e)}(\hat{T})] + [K_\alpha^{(e)}(\hat{T})] \right] \{\hat{T}^{(e)}\} + \right. \\ \left. + \{f_{q_j}^{(e)}(\hat{T})\} + \{f_{q_v}^{(e)}(\hat{T})\} + \{f_\alpha^{(e)}(\hat{T})\} - \{f_q^{(e)}\} \right\} = 0; \\ \sum_{e=1}^M \left\{ [K_\chi^{(e)}(\hat{T})] \{\hat{U}^{(e)}\} + \{f_j^{(e)}\} \right\} = 0, \end{aligned} \right. \quad (\text{B.8})$$

де (e) – індекс СЕ; M – кількість СЕ; $\{\hat{h}^{(e)}\}$, $\{h^{(e)}\}$ – вектори об’ємної ентальпії СЕ на верхньому та нижньому часових рівнях, відповідно, Дж/м³; $\{\hat{T}^{(e)}\}$, $\{T^{(e)}\}$ – вектори абсолютної температури СЕ на верхньому та нижньому часових рівнях, відповідно, К; $[C^{(e)}]$, $[K_\lambda^{(e)}(\hat{T})]$, $[K_\alpha^{(e)}(\hat{T})]$ – матриці СЕ, що пов’язані з демпфіруванням, теплопровідністю (Вт/(м³·К)) та зовнішнім конвективним

теплообміном (Вт/(м³·К)), відповідно; $\{f_{q_j}^{(e)}(\hat{T})\} = \int_{V^{(e)}} \chi^{(e)}(\hat{T}) \|\nabla U^{(e)}\|^2 dV$,
 $\{f_{q_v}^{(e)}(\hat{T})\}, \{f_{\alpha}^{(e)}(\hat{T})\}, \{f_q^{(e)}\}$ – вектори навантаження СЕ, що пов’язані з внутрішнім джерелом теплоти за рахунок джоулевої теплоти та джерелом неелектричної природи, зовнішнім конвективним теплообміном на границі $\Gamma_{T_{III}}$ частини поверхні Ω і густиною теплового потоку на границі $\Gamma_{T_{II}}$ частини поверхні Ω , відповідно, Вт/м³; $V^{(e)}$ – об’єм СЕ, м³; $\{\nabla \hat{U}^{(e)}\} = [B]\{\hat{U}^{(e)}\}$ – градієнт електричного потенціалу СЕ, В/м; $\{\hat{U}^{(e)}\}$ – вектор електричного потенціалу СЕ на верхньому часовому рівні, В; $[K_{\chi}^{(e)}(\hat{T})]$ – матриця СЕ, що пов’язана з електропровідністю, См/м³; $\{f_j^{(e)}\}$ – вектор навантаження СЕ за рахунок заданої густини електричного струму на границі $\Gamma_{U_{II}}$ частини поверхні Ω , А/м³.

Систему дискретних рівнянь (В.8) можна розв’язувати за допомогою побудови теплоелектричного СЕ з двома ступенями свободи (T і U) як це, наприклад, використовується для задач напружено-деформованого стану [148–150]. Основним недоліком такого способу є підвищені вимоги до обчислювальних ресурсів (зокрема, до оперативної пам’яті). Тому з метою мінімізації цих вимог у цій роботі розглядається методика, що побудована на послідовному розв’язанні рівнянь теплопровідності та електропровідності.

Вирази у вигляді інтегральних співвідношень для визначення матриць $[C^{(e)}]$, $[K_{\lambda}^{(e)}]$, $[K_{\alpha}^{(e)}]$ і векторів $\{f_{q_v}^{(e)}\}, \{f_{\alpha}^{(e)}\}, \{f_q^{(e)}\}$ СЕ для лінійних задач теплопровідності можна знайти в [148–150]. Співвідношення для матриці $[K_{\chi}^{(e)}]$ і вектора $\{f_j^{(e)}\}$ рівняння електропровідності нескладно отримати за аналогією з теплопровідністю. Для нелінійної задачі (В.1)–(В.7) ці вирази за виключенням матриці $[C^{(e)}]$ є залежними від температури і, тому в процесі її розв’язання ітераційними методами потребують перерахування на кожному кроці виконання ітерацій, що є неефективним особливо для нестационарних задач. Враховуючи ізотропність фізичних властивостей середовища, цього можна уникнути за допомогою деяких перетворень основних співвідношень СЕ. Наприклад, для матриці СЕ, пов’язаної з теплопровідністю, будемо мати

$$[K_{\lambda}^{(e)}(\hat{T})] = \int_{V^{(e)}} \lambda(T) [B]^T [B] dV \approx \lambda(T_m^{(e)}) \int_{V^{(e)}} [B]^T [B] dV = \lambda(T_m^{(e)}) [k_{\lambda}^{(e)}] \quad (B.9)$$

для матриці СЕ, пов’язаної із зовнішнім конвективним теплообміном

$$[K_{\alpha}^{(e)}(\hat{T})] = \int_{S^{(e)}} \alpha(T) [N]^T [N] dS \approx \alpha(T_m^{(e)}) \int_{S^{(e)}} [N]^T [N] dS = \alpha(T_m^{(e)}) [k_{\alpha}^{(e)}] \quad (B.10)$$

для матриці СЕ, пов’язаної з електропровідністю

$$[K_{\chi}^{(e)}(\hat{T})] = \int_{V^{(e)}} \chi(T) [B]^T [B] dV \approx \chi(T_m^{(e)}) \int_{V^{(e)}} [B]^T [B] dV = \chi(T_m^{(e)}) [k_{\chi}^{(e)}] \quad (B.11)$$

де $V^{(e)}$ – об’єм СЕ, м^3 ; $S^{(e)}$ – поверхня грані СЕ, м^2 ; $[N]$ – матриця-рядок коефіцієнтів форми СЕ; $[B] = \nabla[N]$ – матриця градієнтів СЕ; $T_m^{(e)} = \frac{\sum_{i=1}^M T_i}{M}$ – середня температура СЕ; $[k_\lambda^{(e)}] = [k_\chi^{(e)}] = \int_{V^{(e)}} [B]^T [B] dV$, $[k_\alpha^{(e)}] = \int_{S^{(e)}} [N]^T [N] dS$.

Матриця демпфірування не перетворюється, оскільки за рахунок використання h замість T у (В.8), вона стає незалежною від температури і виражається таким співвідношенням

$$[C^{(e)}(\hat{T})] = \int_{V^{(e)}} [N]^T [N] dV = [c^{(e)}] \quad (\text{В.12})$$

де $[c^{(e)}] = \int_{V^{(e)}} [N]^T [N] dV$.

Аналогічні перетворення також нескладно виконати і для векторів навантаження СЕ $\{f_{q_v}^{(e)}(\hat{T})\}$, $\{f_\alpha^{(e)}(\hat{T})\}$, $\{f_q^{(e)}\}$, $\{f_j^{(e)}\}$. Тепер матриці $[k_\lambda^{(e)}]$, $[k_\alpha^{(e)}]$, $[c^{(e)}]$, $[k_\chi^{(e)}]$, та вектори $\{f_{q_v}^{(e)}\}$, $\{f_\alpha^{(e)}\}$, $\{f_j^{(e)}\}$ СЕ потребують тільки одноразового обчислення на початку ітераційного циклу розв’язання задачі. У результаті виконаних перетворень (В.9)–(В.12) система дискретних рівнянь МСЕ (В.8) набуває вигляду

$$\left\{ \begin{aligned} & \sum_{e=1}^M \left\{ -[c^{(e)}] \frac{\{\hat{h}^{(e)}\} - \{h^{(e)}\}}{\Delta \tau} - ([k_\lambda^{(e)}] \chi(\hat{T}_m^{(e)}) + [k_\alpha^{(e)}] \alpha(\hat{T}_m^{(e)})) \{\hat{T}^{(e)}\} + \right. \\ & \left. + \{f_{q_j}^{(e)}\} + \{f_{q_v}^{(e)}\} q_v(\hat{T}_m^{(e)}) + \{f_\alpha^{(e)}\} \alpha(\hat{T}_m^{(e)}) T_p - \{f_q^{(e)}\} q_n \right\} = 0; \\ & \sum_{e=1}^M \left\{ [k_\chi^{(e)}] \chi(\hat{T}_m^{(e)}) \{\hat{U}^{(e)}\} + \{f_j^{(e)}\} j_n \right\} = 0, \end{aligned} \right. \quad (\text{В.13})$$

де q_n – нормальна густина теплового потоку на грані СЕ, $\text{Вт}/\text{м}^2$; j_n – нормальна густина сили електричного струму на грані СЕ, $\text{А}/\text{м}^2$; $\{f_{q_v}^{(e)}\} = \int_{V^{(e)}} [N]^T dV$;

$$\{f_\alpha^{(e)}\} = \{f_q^{(e)}\} = \{f_j^{(e)}\} = \int_{S^{(e)}} [N]^T dS.$$

Після часткової лінеаризації за методом Ньютона [151] система дискретних рівнянь (В.13) набуває вигляду:

– для рівняння теплопровідності

$$\begin{aligned} & \sum_{e=1}^M \left\{ [k_\lambda^{(e)}] \left[\frac{\partial \lambda^{(e)}(\hat{T}^k)}{\partial T} \hat{T}^k + \lambda^{(e)}(\hat{T}^k) \right] + [k_\alpha^{(e)}] \left[\frac{\partial \alpha^{(e)}(\hat{T}^k)}{\partial T} \hat{T}^k + \alpha^{(e)}(\hat{T}^k) \right] + \right. \\ & \left. + [c^{(e)}] \frac{c_p^{(e)}(\hat{T}^k) \rho^{(e)}(\hat{T}^k)}{\Delta \tau} - \{f_\alpha^{(e)}\} \left[\frac{\partial \alpha^{(e)}(\hat{T}^k)}{\partial T} \right]^T T_p - \{f_{q_v}^{(e)}\} \left[\frac{\partial q_v^{(e)}(\hat{T}^k)}{\partial T} \right]^T \right\} \{\delta \hat{T}^{k+1}\} = \sum_{e=1}^M \{f_\lambda^{(e)}\} \end{aligned} \quad (\text{В.14})$$

– для рівняння електропровідності

$$\sum_{e=1}^M [k_{\chi}^{(e)}] \chi(\hat{T}^k) \{\delta \hat{U}^{k+1}\} = \sum_{e=1}^M \{f_{\chi}^{(e)}\} \quad (B.15)$$

де $\{f_{\lambda}^{(e)}\} = -[c^{(e)}] \frac{\{\hat{h}^{(e)}(T^k)\} - \{h^{(e)}(T)\}}{\Delta \tau} - ([k_{\lambda}^{(e)}] \lambda(\hat{T}^k) + [k_{\alpha}^{(e)}] \alpha(\hat{T}^k)) \{\hat{T}^k\} + \{f_{q_j}^{(e)}\} + \{f_{q_v}^{(e)}\} q_v(\hat{T}_m^k) + \{f_{\alpha}^{(e)}\} \alpha(\hat{T}_m^k) T_p - \{f_q^{(e)}\} q_n$ – вільний член системи дискретних рівнянь (B.14); $\{\delta \hat{T}^{k+1}\}$ – вектор неув'язки за температурою; k – номер ітерації на кожному кроці інтегрування за часом; $\{f_{\chi}^{(e)}\} = \sum_{e=1}^M \{[k_{\chi}^{(e)}] \chi(\hat{T}_m^k) \{\hat{U}^{(e)}\} + \{f_j^{(e)}\} j_n\}$ – вільний член системи дискретних рівнянь (B.15); $\{\delta \hat{U}^{k+1}\}$ – вектор неув'язки за електричним потенціалом.

Тут лінеаризація (B.15) є необов'язковою, але її виконання пояснюється отриманням однакової форми запису систем дискретних рівнянь.

Системи лінеаризованих рівнянь (B.14) і (B.15) можна також переписати відносно вузлових невідомих $\delta \hat{T}$ і $\delta \hat{U}$, відповідно. Наприклад, у разі нелінійності, що спричинена температурною залежністю $c_p, \rho, \lambda, \alpha, \chi$, будемо мати такі системи лінеаризованих рівнянь:

– для рівняння теплопровідності

$$[A_{ij}^{\lambda}] \{\delta T_j\} = \{B_i^{\lambda}\}, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad (B.16)$$

де

$$[A_{ij}^{\lambda}] = [k_{\lambda ij}] \left(\frac{\partial \lambda(\hat{T}_j^k)}{\partial T} \hat{T}_j^k + \lambda(\hat{T}_j^k) \right) + [k_{\alpha ij}] \left(\frac{\partial \alpha(\hat{T}_j^k)}{\partial T} \hat{T}_j^k + \alpha(\hat{T}_j^k) \right) + [c_{ij}] \frac{c_p(\hat{T}_j^k) \rho(\hat{T}_j^k)}{\Delta \tau} - \{f_{\alpha i}^{(e)}\} \left(\frac{\partial \alpha(\hat{T}_j^k)}{\partial T} \right) T_p$$

– матриця системи, що відповідає глобальним номерам

вузлів; $\{B_i^{\lambda}\} = \sum_{e=1}^M \left[-[c^{(e)}] \frac{\{\hat{h}^{(e)}(T^k)\} - \{h^{(e)}(T)\}}{\Delta \tau} - ([k_{\lambda}^{(e)}] \lambda(\hat{T}^k) + [k_{\alpha}^{(e)}] \alpha(\hat{T}^k)) \{\hat{T}^k\} + \{f_{q_j}^{(e)}\} + \{f_{q_v}^{(e)}\} q_v + \{f_{\alpha}^{(e)}\} \alpha(\hat{T}_m^k) T_p - \{f_q^{(e)}\} q_n \right]$ – вектор вільних членів відносно глобальних номерам вузлів;

– для рівняння електропровідності

$$[A_{ij}^{\chi}] \{\delta U_j\} = \{B_i^{\chi}\}, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad (B.17)$$

де $[A_{ij}^{\chi}] = [k_{\chi ij}] \chi(\hat{T}_j^k)$ – матриця системи, що відповідає глобальним номерам вузлів; $\{B_i^{\chi}\} = \sum_{e=1}^M \left\{ [k_{\chi}^{(e)}] \chi(\hat{T}_m^k) \{\hat{U}^{(e)}\} + \{f_j^{(e)}\} j_n \right\}$ – вектор вільних членів відносно глобальних номерам вузлів.

Матриці $[A_{ij}^{\lambda}]$ і $[A_{ij}^{\chi}]$ є розрідженими, тому для їх формування та подальшого розв’язання систем лінійних алгебричних рівнянь (B.16) і (B.17) зазвичай використовується, наприклад, стрічкова їх форма [152], що також значно мінімізує вимоги до обчислювальних ресурсів.

Системи лінеаризованих рівнянь (B.16) і (B.17) на кожному кроці ітерацій розв’язуються послідовно відносно $\{\delta \hat{T}_j^{k+1}\}$ і $\{\delta \hat{U}_j^{k+1}\}$, відповідно, а шукана температура і потенціал у вузлах розрахункової сітки визначається за формулами

$$\begin{cases} \{\hat{T}_i^{k+1}\} = \{\hat{T}_i^k\} + \{\delta \hat{T}_i^{k+1}\}, & i = \overline{1, N}; \\ \{\hat{U}_i^{k+1}\} = \{\hat{U}_i^k\} + \{\delta \hat{U}_i^{k+1}\}, & i = \overline{1, N}, \end{cases} \quad (\text{B.18})$$

де N – кількість вузлів у розрахунковій області.

При цьому система рівнянь (B.17) для електропровідності розв’язується першою в ітераційному циклі розв’язання задачі тепло-електропровідності.

Критерієм отримання числового розв’язку вихідної задачі на кожному часовому кроці є виконання умови

$$|\delta \hat{T}_i^{k+1}| \leq \varepsilon_T, i = \overline{1, N}, \quad (\text{B.19})$$

де ε_T – задана точність розрахунку поля температури, К.

При цьому точність визначення електричного потенціалу, яка є не гіршою за температуру, встановлюється автоматично.

В.3. Програмна реалізація числової методики та тести

Для виконання тестування теплоелектричної задачі використано тетраедні СЕ. Дискретизація розрахункової області проведена за допомогою вільно відкритого програмного забезпечення для автоматизованої генерації сіток Gmsh [123].

Програмна реалізація числової методики виконана на мові програмування високого рівня Python [112] з використанням додаткових відкритих бібліотек SciPy та NumPy. Оцінка точності розрахунків проведена за допомогою порівняння з точними (аналітичними) та числовими розв’язками задач, отриманими за допомогою комерційного програмного забезпечення. Як геометричний об’єкт обрано циліндр за різних комбінацій задання граничних умов конвективного типу для рівняння теплопровідності та умов Дирихле та Неймана для рівняння електропровідності за умов стаціонарного та нестаціонарного розподілу полів температури, для яких існують точні розв’язки для випадку лінійних задач [153].

Тестування розробленого програмного забезпечення для розв'язання зв'язаної нестационарної задачі тепло-електропровідності ізотропного середовища проведено за декількома тестами, що включають лінійні та нелінійні задачі.

Тест 1. Стаціонарна лінійна задача тепло-електропровідності циліндра радіусом 0,05 м та висотою 0,1 м з коефіцієнтом теплопровідності 12 Вт/(м·К), електропровідності 500 См/м за граничних умов для I, II і III роду на торцях та бічній стороні для рівнянь електропровідності та теплопровідності, відповідно: нижній торець $U = 0$ В; верхній торець $j_n = 2500/5000/10000$ А/м²; бічна сторона $\alpha = 15$ Вт/(м²·К), $t_{p1} = 35$ °С (табл. В.1).

Тест 2. Стаціонарна нелінійна задача теплоелектропровідності циліндра радіусом 0,05 м і заввишки, 0,1 м теплопровідністю $\lambda(t) = 159,218e^{-1,116 \times 10^{-3}t}$ Вт/(м·К), електропровідністю $\chi(t) = 73086,2 - 7,032 \cdot 10^{-9}t^4 + 5,188 \cdot 10^{-5}t^3 - 1,381 \cdot 10^{-1}t^2 + 136,36t$ См/м за граничних умов для I, II і III роду на торцях та бічній стороні для рівнянь електропровідності й теплопровідності, відповідно: нижній торець $U = 0$ В; верхній торець $j_n = 0,5 \cdot 10^5 / 0,1 \cdot 10^6 / 0,2 \cdot 10^6$ А/м²; бічна сторона $\alpha = 15$ Вт/(м²·К), $t_{p1} = 35$ °С (табл. В.2).

Таблиця В.1. Результати порівняння за тестом 1

Тип розв'язку	$t_{ст}-t_{ц}, j_n=2500$ А/м ²	$t_{ст}-t_{ц}, j_n=5000$ А/м ²	$t_{ст}-t_{ц}, j_n=10000$ А/м ²
Точний розв'язок [153]	55,827–56,478	118,309–120,912	368,235–378,649
Авторський код, вузлів 1218, СЕ – 4804	55,795–56,451	118,18–120,804	367,721–378,214
q_v , Вт/м ³	$1,25 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^5$
Похибка, %	0,068–0,058	0,11–0,09	0,14–0,11

Примітка. $t_{ст}$, $t_{ц}$ – температура стінки та центру циліндра, відповідно, °С.

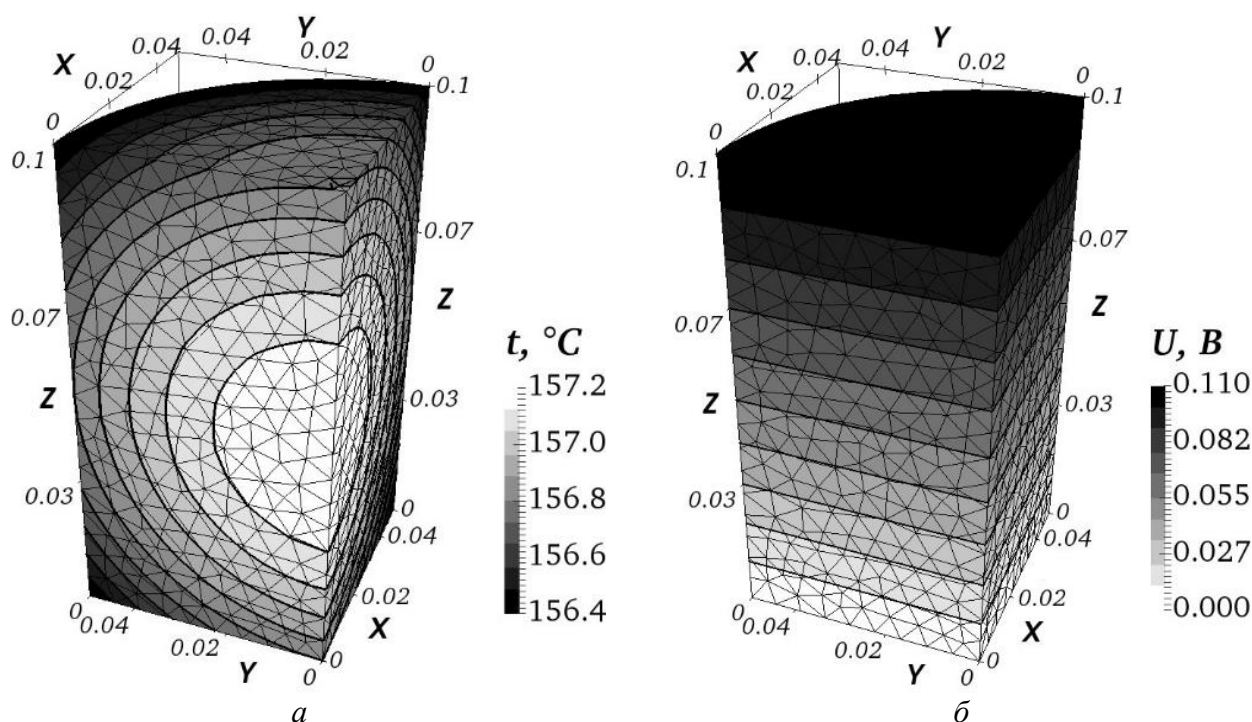
Таблиця В.2. Результати порівняння за тестом 2

Тип розв'язку	$j_n=0,5 \cdot 10^5$ А/м ²		$j_n=1 \cdot 10^5$ А/м ²		$j_n=2 \cdot 10^5$ А/м ²	
	$t_{ст}-t_{ц}$, °С	U_{max} , В	$t_{ст}-t_{ц}$, °С	U_{max} , В	$t_{ст}-t_{ц}$, °С	U_{max} , В
Matlab [154]	85,23–85,35	0,0602	207,04–207,46	0,1032	612,71–614,27	0,1732
Авторський код, вузлів 1218, СЕ – 4804	84,71–84,85	0,0597	208,36–209,04	0,1042	610,07–618,7	0,1729
Похибка, %	0,61–0,59	0,83	0,64–0,77	0,97	0,43–0,72	0,17

Тест 3. Нестационарна нелінійна задача тепло-електропровідності циліндра радіусом 0,05 м і заввишки 0,1 м з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda(t) = 159,218e^{-1,116 \times 10^{-3}t}$ Вт/(м·К), масовою ізобарною теплоємністю $c_p(t) = 712,2 + 2,933 \times 10^{-7}t^3 - 1,444 \times 10^{-3}t^2 + 2,406t$ Дж/(кг·К), густиною $\rho(t) = 1853 - 5,453 \times 10^{-5}t^2 - 0,127t$ кг/м³ та електропровідністю

$\chi(t) = 73086,2 - 7,032 \cdot 10^{-9} t^4 + 5,188 \cdot 10^{-5} t^3 - 1,381 \cdot 10^{-1} t^2 + 136,36t$ См/м за граничних умов для I, II і III родів на торцях і бічній стороні для рівнянь електропровідності та теплопровідності, відповідно: нижній торець $U = 0$ В; верхній торець $j_n = 10^5$ А/м²; торці та бічна сторона $\alpha = 15$ Вт/(м²·К), $t_{p1} = 35$ °С. Початкова температура $t_0 = 35$ °С. (табл. В.3).

Результати числового моделювання за тестом 3 з використанням розробленого програмного забезпечення наведено на рис. В.1. Візуалізація результатів розрахунків теплоелектричної задачі виконана з використанням відкритого програмного коду ParaView [147].



а – поле температури; б – поле електричного потенціалу
Рис. В.1. Результати числового моделювання за тестом 3 на 4 год

Таблиця В.3. Результати порівняння за тестом 3

	$(t_{cm.} - t_{y.}) / U_{max}, ^\circ\text{C/V}$				
Час, год	0,5	1	2	3	4
Matlab [154]	(115,96–116,39) / 0,1148	(141,22–141,80) / 0,1114	(154,17–154,84) / 0,1098	(156,16–156,84) / 0,1096	(156,47–157,15) / 0,1096
Авторський код, 120 кроків за часом, вузлів 1218, СЕ – 4804	(116,71–117,22) / 0,1147	(141,58–142,28) / 0,1114	(154,13–154,94) / 0,1099	(156,05–156,87) / 0,1096	(156,35–157,18) / 0,1096
Похибка, %	(0,65–0,71) / 0,087	(0,26–0,34) / 0,0	(0,03–0,07) / 0,08	(0,07–0,02) / 0,0	(0,08–0,02) / 0,0

Аналіз порівняння результатів показав, що дані моделювання за розробленим програмним забезпеченням збігаються з аналітичними та

числовими розв'язками, які були отримані з використанням комерційного програмного забезпечення Matlab [154]. При цьому максимальне значення похибки визначення температури й електричного потенціалу не перевищує (0,2–0,83) % залежно від умов задачі.

Основні результати проведених досліджень опубліковані в працях [155–160].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Уббеллоде А. Р., Льюис Ф. А. Графит и его кристаллические соединения. Москва : Мир, 1965. 256 с.
2. Ядерный графит / С. Е. Вяткин, А. Е. Деев, В. Г. Нагорный и др. Москва : Атомиздат, 1967. 279 с.
3. Искусственный графит / В. С. Островский, Ю. С. Виргильев, В. И. Костиков, И. П. Шипков. Москва : Металлургия, 1986. 272 с.
4. Бутырин Г. М. Высокопористые углеродные материалы. Москва : Химия, 1976. 190 с.
5. Шулепов С. В. Физика углеграфитовых материалов. Москва : Металлургия, 1972. 254 с.
6. Фиалков А. С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. Москва : Аспект Пресс, 1997. 718 с.
7. Красюков А. Ф. Нефтяной кокс. Москва : Химия, 1966. 264 с.
8. Привалов В. Е., Степаненко М. А. Каменноугольный пек. Москва : Металлургия, 1981. 208 с.
9. Чалых Е. Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий. Москва : Металлургия, 1972. 432 с.
10. Васильев Ю. Н., Котосонов А. С., Емельянова В. М. Влияние дефектов структуры углерода на скорость окисления // Неорганические материалы. 1974. Т. 10, № 11. С. 2082–2085.
11. Свойства конструкционных материалов на основе углерода / В. Г. Нагорный, А. С. Котосонов, В. С. Островский и др.; под ред. В. П. Соседова. Москва : Металлургия, 1975. 336 с.
12. Шешин Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. Москва : Изд-во МФТИ, 2001. 288 с.
13. Графит в науке и ядерной технике / Е. И. Жмуриков, И. А. Бубненко, В. В. Дрёмов и др. Новосибирск : Изд-во СО РАН. 2013. 193 с.
14. Соседов В. П. История развития углеродной промышленности. Москва : Аспект-Пресс, 1999. 264 с.
15. Селезнёв А. П. Углеродистое сырьё для электродной промышленности. Москва : Профиздат, 2000. 256 с.
16. Burchell T. D. A microstructurally based fracture model for polygranular graphites // Carbon. 1996. Vol. 34, N 3. P. 297–316.
17. Самойлов В. М. Получение тонкодисперсных углеродных наполнителей и разработка технологии производства тонкозернистых графитов на их основе : автореф. дис. д-ра тех. наук : 05.17.11 [НИИ конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит»]. М., 2006. 56 с.
18. Бутырин Г. М. Плотность, пористая структура и газодинамические характеристики тонкозернистых графитов (обзор) // Химия твердого топлива. 2015. № 5. С. 40–53.
19. Лгалов В. В., Токарев А. М. Изучение эксплуатационной стойкости деталей из искусственного графита при изготовлении металлостеклянных соединений // Жизненный цикл конструкционных материалов : материалы V Всерос. с межд. участием науч.-технич. конф. Иркутск, 2015. С. 56–64.

20. *Chung, D. D. L.* Review. Graphite // *Journal of materials science*. 2002. Vol. 37, Issue 8. P. 1475–1489. doi: 10.1023/A:1014915307738.
21. *Вургильев Ю. С.* Термостойкость и трещиностойкость конструкционных углеродных материалов // *Неорганические материалы*. 1994. Т. 30, № 11. С. 1388–1391.
22. *Вургильев Ю. С.* Вязкость разрушения конструкционных углеродных материалов // *Неорганические материалы*. 1994. Т. 30, № 11. С. 1399–1404.
23. *Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Jorio A.* Group Theory: Application to the Physics of Condensed Matter Berlin : Springer. 2008. 582 p. doi: 10.1007/978-3-540-32899-8.
24. *Левашова А. И., Кравцов А. В.* Химическая технология углеродных материалов: учебное пособие. Томск : Изд-во ТПУ. 2008. 112 с.
25. *Уббеллоде А. Р., Льюис Ф. А.* Графит и его кристаллические соединения. Москва : Мир. 1965. 256 с.
26. *Oberline A.* Carbonization and graphitization // *Carbon*. 1984. Vol. 22, N 4/5. P. 335–339.
27. *Barklie R. C.* Characterisation of defects in amorphous carbon by electron paramagnetic resonance // *Diamond and Related Materials*. 2003. Vol. 12, Issue 8. P. 1427–1434. doi: 10.1016/S0925-9635(03)00004-9.
28. *Способ определения текстурных параметров дисперсных частиц углеродных материалов* : пат. 2076317 С1 Российская Федерация: МПК G01N 27/72 / А. С. Котосонов, И. Я. Левинтович, Н. С. Алешкина, заявитель и патентообладатель – НИИГрафит. № 5024507/21; заявл. 28.01.1992; опубл. 27.03.1997. 5 с.
29. *Левинтович И. Я., Котосонов А. С., Бучнев Л. М.* Структурные факторы, определяющие термическое расширение поликристаллических графитов // *Химия твёрдого топлива*. 1990. № 2. С. 130–135.
30. *Electronic properties of high-temperature carbon fibres and their correlations* / D. Robson, F. Y. I. Assabghy, E. G. Cooper, D J. E. Ingram // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1973. Vol. 6, N 15. P. 1822–1834.
31. *Auquie D., Oberline M., Oberline A.* Microtexture of mesophase spheres as studied by high resolution conventional transmission electron microscopy (STEM) // *Carbon*. 1980. Vol. 18, N 5. P. 337–346.
32. *Oberline A., Villey M., Combaz A.* Influence of elemental composition on carbonization pyrolysis of kerogen shale and kuckersite // *Carbon*. 1980. Vol. 18, N 5. P. 347–353.
33. *Generation of curved or closed-shell carbon nanostructures by ball-milling of graphite* / X. H. Chen, H. S. Yang, G. T. Wu et al. // *Journal of Crystal Growth*. 2000. Vol. 218. P. 57–61.
34. *Transmission electron microscopy studies on carbon materials prepared by mechanical milling* / F. Salver-Disma, J.-M. Taranscon, C. Clinard, J.-N. Rouzaud // *Carbon*. 1999. Vol. 37. P. 1941–1959.
35. *Келли А.* Высокопрочные материалы. Москва : Мир, 1976. 261 с.
36. *Guellali M., Oberacker R., Hoffmann M. J.* Influence of temperature and pressure treatments on characteristics and microstructure of C/C-composites // *Eurocarbon 2000. 1-st World Conference on Carbon*. Berlin, 9–13 July 2000. P. 185–186.

37. Гаврилова Н. Н., Назаров В. В., Яровая О. В. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов. М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. 52 с.
38. Tucker M. O., Rose A. P. G., Burchell T. D. The Fracture of Polygranular graphites // Carbon. 1986. Vol. 24. P. 581–602.
39. *Advanced Materials Science and Engineering of Carbon* / M. Inagaki, F. Kang, M. Toyoda, H. Konno. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2013. 440 p.
40. Балыкин В. П. Кинетическая модель процессов адсорбционного взаимодействия в системе наполнитель-связующее на начальных стадиях получения искусственных углеродных материалов // Вестник Челябинского государственного университета. 1996. Т. 4, № 1. С. 66–72.
41. *Graphitization of carbon fibre / glassy carbon composites* / Y. Hishiyama, M. Inagaki, S. Kimura, S. Yamada // Carbon. 1974. Vol. 12, issue 3. P. 249–254.
42. *Advanced materials science and engineering of carbon* / Inagaki M., Kang F., Toyoda M., Konno H. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014. 440 p.
43. Нонишнев Н. П., Фролов А. В. Исследования в области разработки отечественной технологии получения изостатического графита // Наука ЮУрГУ. Секции естественных наук : материалы 67-й науч. конф. / отв. за вып. С. Д. Ваулин ; Юж.-Урал. гос. ун-т. Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2015. С. 364–368.
44. Asao O. High density isotropic graphites and glassy carbons. Japanese situation: production, properties and applications / ed. H. Marsh, E. A. Heintz, F. Rodriques-Reinoso. Alicante : Universidad de Alicante. Secretariado de Publicaciones. 1997. 564 p.
45. Способ получения графитированного материала : пат. 2252190 С1 Российская Федерация: МПК⁷ С 01 В 31/02, С 04 В 35/52 / Ю. С. Елисеев, В. А. Поклад, А. Н. Шутов и др.; заявитель и патентообладатель – ФГУП "ММПП "САЛЮТ". № 2004107239/15; заявл. 12.03.2004; опубл. 20.05.2005, Бюл. № 14. 6 с.
46. Наноструктурированный каменноугольный пек и способ его получения : пат. 2394870 С1 Российская Федерация: МПК (2006.01) С10С 3/10, В82В 1/00 / Н. Ю. Бейлина, Н. В. Липкина, А. В. Петров ; заявитель и патентообладатель – ФГУП "НИИграфит". № 2008148549/04; заявл. 10.12.2008; опубл. 20.07.2010, Бюл. № 20. 8 с.
47. Способ получения высокоплотных мелкозернистых углеграфитовых материалов : пат. 2256610 С2 Российская Федерация: МПК⁷ С 01 В 31/04, С 04 В 35/52 / А. А. Свиридов, А. Н. Селезнев, С. А. Подкопаев и др.; заявитель и патентообладатель – ОАО "Челябинский электродный завод". № 2003116383/15; заявл. 04.06.2003; опубл. 27.02.2005, Бюл. № 20. 5 с.
48. Новые высокопрочные углеродные материалы для высоких технологий / В. И. Костиков, В. М. Самойлов, Н. Ю. Бейлина, Б. Г. Остронов // Российский химический журнал. 2004. Т. XLVIII, № 5. С. 64–75.
49. Способ изготовления заготовок из мелкозернистого графита : пат. 2488554 С2 Российская Федерация: МПК (2006.01) С01В 31/04, С 04 В 35/52 / А. А. Клименко, С. М. Морозов, Л. И. Филиппова. № 2011142450/05; заявл. 21.10.2011; опубл. 27.07.2013, Бюл. № 21. 8 с.

50. *Способ* получения заготовок из мелкозернистого графита : пат. 2493098 С1 Российская Федерация: МПК (2006.01) С01В 31/04, В82В 3/00, (2011.01) В82У 30/00 / А. А. Лавренов, В. П. Фокин ; заявитель и патентообладатель – ООО "Донкарб Графит". № 2012100051/05; заявл. 11.01.2012; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26. 11 с.
51. *Hoffmann W. R., Hüttinger K. J.* Sintering of powders of polyaromatic mesophase to high-strength isotropic carbons-I. Influence of the raw material and sintering conditions on the properties of the carbon materials // *Carbon*. 1994. Vol. 32, № 6. P. 1087–1103. doi: 10.1016/0008-6223(94)90218-6.
52. *Самойлов В. М., Стрелецкий А. Н.* Влияние сверхтонкого измельчения на кристаллическую структуру и графитируемость тонкодисперсных углеродных наполнителей // *Химия твердого топлива*. 2004. № 2. С. 53–59.
53. *Влияние* длительности совместного виброизмельчения и давления прессования на плотности и усадки заготовок графита / Е. В. Тимошук, В. М. Самойлов, Е. И. Тимошук, В. К. Смирнов // *Химия твердого топлива*. 2011. № 1. С. 60–64.
54. *Chard W., Conaway M., Niesz O.* Advanced high pressure graphite processing technology // *Petroleum derived carbons. ACS Symposium series*. 1979. Vol. 21. P. 155–171. doi: 10.1021/bk-1976-0021.ch014.
55. *Определение* размеров частиц тонкодисперсных порошков искусственного графита методом лазерной дифракции / Е. И. Тимошук, В. М. Самойлов, А. Я. Ляпунов и др. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т. 78, № 11. С. 25–28.
56. *Самойлов В. М.* Удельная поверхность, размеры и форма частиц тонкодисперсных углеродных наполнителей // *Неорганические материалы*. 2010. Т. 46, № 8. С. 913–918.
57. *Ucar* isostatic molded graphite, URL: <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=UCAR%20Isostatic%20Molded%20Graphite> (last access: 31.05.2020).
58. *Technical Data Sheets: SIGRAFINE Isostatic Graphite*. URL: <https://www.sglgroup.com/cms/international/infokorb/Downloadcenter/products/fgg/technical-data-sheets/iso/index.html> (last access: 31.05.2020).
59. *MERSEN*. Main graphite grades. URL: https://www.mersen.com/fileadmin/user_upload/pdf/ht/19-graphite-grades-mersen.pdf (last access: 31.05.2020).
60. *TOYO TANSO CARBON PRODUCTS*. Special Graphite (Isostatic Graphite). URL: http://toyotanso.com/Products/Special_graphite/data.html (last access: 31.05.2020).
61. *IBIDEN* Fine Graphite Material. Property Data. URL: <https://www.fgm.ibiden.co.jp/multilanguage/english/list.html> (last access: 31.05.2020).
62. *Tracy L. A., Doug J. M.* The characterization of highly crystalline, isotropic graphite. Carbon 2007 Conference, 15–20 July 2007, Seattle, Washington, USA.
63. *Global Isostatic Graphite Market 2015 Industry Trends, Analysis & Forecast to 2020*. Florida: QY Research, 2015. 153 p.

64. *Randall T.* The world nears peak fossil fuels for electricity. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-06-13/we-ve-almost-reached-peak-fossil-fuels-for-electricity> (last access: 31.05.2020).
65. *Фотоелектричні* перетворювачі сонячного випромінювання. Досягнення, сучасний стан і тенденції розвитку / Д. М. Фреїк, В. М. Чобанюк, М. О. Галушак та ін. // *Фізика і хімія твердого тіла*. 2012. Т. 13, № 1. С. 7–20.
66. *Inkjet-printed graphene electrodes for dye-sensitized solar cells* / D. Dodoo-Arhin, R. C. T. Howe, G. Hu et al. // *Carbon*. 2016. Vol. 105. P. 33–41. doi: 10.1016/j.carbon.2016.04.012.
67. *Ultrathin and flexible perovskite solar cells with graphene transparent electrodes* / Zh. Liu, P. You, Ch. Xie et al. // *Nano Energy*. 2016. Vol. 28. P. 151–157. doi: 10.1016/j.nanoen.2016.08.038.
68. *Самойлов В. М.* Получение тонкодисперсных углеродных нанолнителей и разработка технологи производства тонкозернистых графитов на их основе: дис. ... д-ра техн. наук. М. : НИИГрафит, 2006. 358 с.
69. *Нефтяной* игольчатый кокс. Структура и свойства / Р. Н. Гимаев, Н. Н. Шипков, М. С. Горпиненко и др. Уфа : изд. Башкирск. ун-та, 1996. 212 с.
70. *Noriyosi F., Makoto H., Ken N.* Kawasaki Stell Techn. Rept. 1987, N16. P. 114–116.
71. *Островский В. С., Бейлина Н. Ю., Липкина Н. В.* // *Химия твердого топлива*. 1995. №1. С. 55–61.
72. *Влияние α_1 -фракции* высокотемпературного пека на свойства мелкозернистых графитов / Н. А. Лапина, Н. С. Стариченко, М. В. Аверина и др. // *Кокс и химия*. 1990. №7. С. 10–12.
73. *Диспергирование* и смешивание в процессе переработки пластмасс / В. С. Ким, В. В. Скачков. Москва : Химия, 1976. 240 с.
74. *Сиденко П. М.* Измельчение в химической промышленности. Москва : Недра, 1977. 388 с.
75. *Акунов В. И.* Струйные мельницы. Москва : Машиностроение, 1967. 263 с.
76. *Барский М. Д.* Фракционирование порошков. Москва : Недра, 1980. 327 с.
77. *Ныч А. В., Блиничев В. Н.* Роль газодинамического торможения частиц перед рабочим органом при измельчении свободным ударом // в сб.: *Разработка теории и конструктивного оформления машин и аппаратов интенсивного действия с участием зернистых материалов*. Иваново, 1984. С. 35–39.
78. *Відновлення* теплофізичних властивостей сипких матеріалів за допомогою розв'язання зворотної задачі теплопровідності / А. Я. Карвацький, Г. М. Васильченко, Т. В. Чирка, К. М. Короленко // *Вісник Хмельницького нац. ун-ту. Серія: Технічні науки*. 2017. Т. 251, № 4. С. 159–166.
79. *Експрес-методика* визначення середньомасової температури вуглеграфітових виробів в печах графітування за технологією Кастнера / Є. М. Панов, С. В. Лелека, А. Я. Карвацький та ін. // *Вісник НТУУ «КПІ». Сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2018. № 1(17). С. 39–45.
80. *Сучасний* стан ресурсоенергозбереження у технології виробництва вуглецевмісного наповнювача електродних виробів (Огляд) / Є. М. Панов,

Т. В. Лазарєв, А. Я. Карвацький // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2019. № 1. С. 17–34. doi: 10.33070/etars.1.2019.02.

81. *Thermoelectric Properties of Granular Carbon Materials* / A. Ya. Karvatskii, G. M. Vasilchenko, E. M. Panov et al. // *Advanced Thermoelectric Materials* / Chong Rae Park (ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., Beverly, MA 01915-6106 : Scrivener Publishing LLC, 2019. P. 437–468. doi: 10.1002/9781119407348.ch10.

82. *Determining efficient values for the thermophysical properties of bulk materials* / A. Karvatskii, Ye. Panov, G. Vasylenko et al. // *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2. No 5(98). P. 55–62. doi: 10.15587/1729-4061.2019.164791.

83. *Микульєнок І. О.* Определение теплофизических свойств термопластичных композиционных материалов // *Пластические массы*, 2012. № 5. С. 9–13.

84. *Mikulenok I. O.* Determining the thermophysical properties of thermoplastic composite materials // *International Polymer Science and Technology*. 2013. Vol. 40, N 9. P. 23–28.

85. *Причины* возникновения трещин в заготовках на основе непрокаленного нефтяного кокса в начальной стадии термообработки / Н. А. Лобастов, А. Н. Деев, Г. Н. Багров // в сб.: *Конструкционные материалы на основе углерода*. Москва : Металлургия, 1970. №5. С. 27–31.

86. *Мікульєнок І. О., Радченко Л. Б.* Переробка вторинної сировини екструзією : монографія. Київ : НТУУ «КПІ», 2006. 184 с.

87. *Мікульєнок І. О.* Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини : монографія. Київ : НТУУ «КПІ», 2009. 264 с.

88. *Mikulionok I. O., Radchenko L. B.* Screw Extrusion of Thermoplastics: I. General Model of the Screw Extrusion // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2012. Vol. 85, N 3. P. 489–504. doi: 10.1134/S1070427211030305.

89. *Mikulionok I. O., Radchenko L. B.* Screw Extrusion of Thermoplastics: II. Simulation of Feeding Zone of the Single Screw Extruder // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2012. Vol. 85, N 3. P. 505–514. doi: 10.1134/S1070427211030317.

90. *Mikulionok I. O.* Screw extruder mixing and dispersing units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 49, N 1–2. P. 103–109. doi: 10.1007/s10556-013-9711-y.

91. *Мікульєнок І. О.* Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 312 с.

92. *Мікульєнок І. О.* Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. 324 с.

93. *Процеси та обладнання хімічної технології: підручник: [у 2 ч.]* / Я. М. Корнієнко, Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульєнок та ін. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 716 с.

94. *Mikulionok I. O.* Pretreatment of Recycled Polymer Raw Material // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2011. Vol. 83, N 6. P. 1105–1113. doi: 10.1134/S1070427211060371

94. Мікульонюк І. О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології: підручник. К., НТУУ «КПІ», 2014. 340 с.
95. Mikulionok I. O. Structural Implementation of the Process of Elasto-Deformation Shredding of Rubber-Containing Wastes (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Vol. 51, N 9–10. P. 604–608. doi: 10.1007/s10556-016-0093-9.
97. Мікульонюк І. О. Механічні та гідромеханічні процеси, апарати і машини хімічної технології : навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. 172 с
98. Исследование особенностей структуры саже-пековых смесей, полученных в вибромельницах периодического и непрерывного действия / В. А. Дербенев, Б. И. Дюжиков, А. А. Козырев и др. // в сб.: Электроугольные материалы и изделия. Москва : Энергия, 1975. С. 110.
99. Попилинский Р. Я., Кондрашов Ф. В. Прессование керамических порошков. Москва : Металлургия, 1968, 272 с.
100. Modification of implicit algorithm for solving a problem on the elastic plasticity of bulk materials / A. Ya. Karvatskii, E. M. Panov, A. Yu. Pedchenko, V. I. Shkil // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, N 7(89). P. 17–23. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109550.
101. Карвацький А. Я. Механіка суцільних середовищ : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. 292 с.
102. Теоретично-експериментальні дослідження печей графітування Кастнера: монографія / А. Ю. Педченко, Є. М. Панов, А. Я. Карвацький та ін. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 174 с.
103. Карвацький А. Я. Механіка суцільних середовищ. Розв'язання задач: навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 391 с.
104. Графит как высокотемпературный материал / сб. статей; под ред. К. П. Власова. Москва : Мир, 1964. 424 с.
105. Механические напряжения при термической обработке полуфабриката искусственного графита / В. А. Черных // в сб.: Конструкционные материалы на основе углерода. Москва : Металлургия, 1979. С. 45–59.
106. О распределении температур и термических напряжений в углеграфитовых телах цилиндрической формы / Э. А. Шувалов // сб. трудов ЧЭМК. Челябинск : Южно-уральское кн. изд-во, 1970. № 2. С. 200–214.
107. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением ; пер. с англ. ; под ред. Б. А. Хрусталева. Москва : Мир, 1975. 934 с.
108. Карвацький А. Я., Пулінець І. В., Шилович І. Л. Математична модель тепло-гідродинамічного стану багатокammerної печі при випалюванні електродних заготовок // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. № 1/4 (55). С. 33–37.
109. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий : моногр. / И. В. Пулинец, Е. Н. Панов, А. Я. Карвацкий и др. Киев : НТУУ «КПИ», 2014. 176 с.
110. A New Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation / T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir et al. // Computers Fluids. 1995. Vol. 24, N 3. P. 227–238.

111. *The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox*. URL: <http://www.openfoam.com/> (last access: 31.05.2020).
112. *Python*. URL: <https://www.python.org/> (last access: 31.05.2020).
113. *Калиткин Н. Н.* Численные методы: уч. пособие. 2-е изд., исправленное. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 586 с.
114. *Pieklo J., Maj M.* Analysis of the state of stress in the connection of graphite electrodes // *Archives of foundry engineering*. 2015. Vol. 15, spec. Issue 1. P. 85–88.
115. *Numerical simulation analysis on lengthwise graphitization furnace co-production silicon carbide* / L. Yonggang, H. Yangdong, W. Lianying, Y. Chunli // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 557559. P. 835–838. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.557-559.835.
116. *Higman C., Burgt van der M.* Gasification. London: Elsevier Science & Technology Books. 2008. 456 p.
117. *Basu P.* Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory. London, New York : Published by Elsevier Inc. 2010. 365 p. doi: 10.1016/B978-0-12-374988-8.00001-5.
118. *Numerical analysis of physical fields of graphitization process of electrode production in Castner's furnace* / A. Karvatskii, S. Leleka, A. Pedchenko, T. Lazarev // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016. N 6(5(84)), P. 19–25. doi: 10.15587/1729-4061.2016.83191.
119. *Расчетное обоснование внедрения технологического процесса прямоточной графитации на ОАО "Укрграфит"* / А. Я. Карвацкий, И. Л. Шилович, С. В. Кутузов и др.. // *Вісник НТУУ "КПІ". Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження: Зб. наук. праць*. 2008. №1(1). С. 42–46.
120. *Теоретические и экспериментальные исследования теплоэлектрического и механического состояния высокотемпературных агрегатов : моногр.* / А. Я. Карвацкий, Е. Н. Панов, С. В. Кутузов и др. Киев : НТУУ «КПИ», 2012. 358 с.
121. *Making the Heat-Insulating Charge of Acheson Graphitization Furnaces More Efficient* / S. Kutuzov, V. Buryak, V. Derkach et al. // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2014. N 55(1). P. 15–16. doi: 10.1007/s11148-014-9648-5.
122. *Карвацкий А. Я., Педченко А. Ю.* Розв'язання нелінійної нестационарної задачі тепло-електропровідності методом скінченних елементів // *Вісник ПДТУ. Серія: Технічні науки*. 2016. Вип. 32. С. 205–214.
123. *Gmsh*. A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. URL: <http://geuz.org/gmsh/> (last access: 31.05.2020).
124. *Дослідження нерівномірності розподілу температурного поля в заготовках під час їх графітування у печі Кастнера* / С. В. Лелека, Т. В. Лазарев, А. Ю. Педченко, Д. Г. Швачко // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. Т. 6, № 5(78). С. 28–32. doi: 10.15587/1729-4061.2015.56642.
125. *Дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів на процес прямого графітування електродів у печах Кастнера* / А. Я. Карвацкий, Є. М. Панов, А. Ю. Педченко та ін.. // *Вісник НТУ «ХПІ» серія: «Нові рішення в сучасних технологіях»* 2017. № 32 (1254). С. 30–36. doi: 10.20998/2413-4295.2017.32.05.

126. *Electrical* contact resistance research of graphite with copper and thermo-expanded graphite / A. Karvatskii, S. Leleka, I. Pulyneć et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2014, N 5.5(71). P. 45-49, doi:10.15587/1729-4061.2014.27989.
127. *Matsumoto R., Hoshina Y., Akuzawa N.* Thermoelectric Properties and Electrical Transport of Graphite Intercalation Compounds // Materials Transactions. 2009. Vol. 50, N 7. P. 1607–1611. doi:10.2320/matertrans.E-M2009813
128. *Matsumoto R., Okabe Y., Akuzawa N.* Thermoelectric Properties and Performance of n-Type and p-Type Graphite Intercalation Compounds // Electronic Materials. 2015. Vol. 44, N 1. P. 399–406. doi:10.1007/s11664-014-3409-6.
129. *System* for reduction in temperature variation during lengthwise graphitization of carbon bodies: application WO2001/078460 : IPC B32B 18/00 / T. W. Weber, J. J. Pavlisin, J. W. Tzeng et al. ; applicant is Graph Tech Inc. Appl. N PCT/US2000/009528; filing date 10.04.2000; publ. date 18.10.2001. 24 p.
130. *Вплив вмісту вологи в теплоізоляційному матеріалі на тепловий стан печі Кастнера* / А. Я. Карвацький, А. Ю. Педченко, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2018. № 1. С. 24–29.
131. *Kuznetsov D. M.* Shrinkage phenomena in graphitization of preforms in Castner furnaces // Refractories and Industrial Ceramics. 2000. Vol. 41, N 7–8. P. 279–282. doi: 10.1007/BF02693765.
132. *Панов Е. Н., Лелека С. В., Коржик М. В.* Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов // ПиКАД. 2005. № 2. С. 28–30.
133. *SGL GROUP. SIGRAFINE Fine-Grain Graphite.* URL: https://www.sglgroup.com/cms/international/products/product-groups/fgg/specialty-graphites-for-electrical-discharge-machining/material.html?__locale=en (last access: 31.05.2020).
134. *Тепловое* расширение искусственных графитов в интервале температур 293–1650 К / С. В. Станкус, О. С. Яцук, Е. И. Жмуриков, Л. Текчио // Теплофизика и аэродинамика. 2012. Т. 19, № 5. С. 637–642.
135. *Фізичні властивості вуглецевих сипучих матеріалів : моногр.* / Т. В. Чирка, Г. М. Васильченко, Є. М. Панов та ін. // Київ: НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка», 2016. 152 с.
136. *Никитенко Н. И.* Сопряженные и обратные задачи тепломассопереноса. Киев : Наук. думка, 1988. 240 с.
137. *Тихонов А. Н., Арсенин В. Я.* Методы решения некорректных задач. Москва : Наука, 1979.
138. *Карвацький А. Я.* Моделювання енергозберігаючих регламентів промислового обладнання : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 234 с.
139. *Vasil'chenko G. N., Chirka T. V., Panov E. N.* Thermal conductivity of carbon-based materials // Refractories and Industrial Ceramics. 2013. Vol. 54, Issue 1. P. 39–43.
140. *Mathcad.* Engineering math software that allows perform, analyze, and share your most vital calculations. URL: <http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad/> (last access: 31.05.2020).
141. *Karvatskii A., Marchevsky V., Novokhat O.* Numerical modeling of physical fields in the process of drying of paper for corrugating by the infrared radiation //

Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 2, N 5(86). P. 14–22. doi: 10.15587/1729-4061.2017.96741

142. *Агроскин А. А., Гончаров Е. И.* Теплоемкость углей // Кокс и химия. 1965. № 7. С. 8–13.

143. *Non-linear finite element analysis of solids and structures*. 2nd ed. / R. Borst, M. A. Crisfield, J. J. C. Remmers, C. V. Verhoosel. New York : John Wiley & Sons Ltd, 2012. 516 p. doi: 10.1002/9781118375938.

144. *Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. D.* The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. 7th ed. London, New York : Publ. by Elsevier Ltd., 2014. 624 p.

145. *Lawrence N.* Compaq Visual Fortran. Sydney: Digital Press, 2002, 600 p.

146. *Thompson M., Thompson J.* ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 462 p.

147. *ParaView*. An open-source, multi-platform data analysis and visualization application. URL: <http://www.paraview.org> (last access: 31.05.2020).

148. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике ; пер. с англ. ; под ред. Б. Е. Победри. Москва : Мир, 1975. 541 с.

149. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов ; пер. с англ. А. А. Шестакова ; под ред. Б. Е. Победри. Москва : Мир, 1979. 392 с.

150. *Карвацкий А. Я.* Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів: навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2015. 392 с.

151. *Самарский А. А., Попов Ю. П.* Разностные методы решения задач газовой динамики. Москва : Наука, 1980. 352 с.

152. *Джордж А. Лю Дж.* Численное решение больших разреженных систем уравнений ; пер. с англ. Х. Д. Икрамова. Москва : Мир, 1984. 334 с.

153. *Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.* Теплопередача : учебник для вузов. Москва : Энергоиздат, 1981. 416 с.

154. *Matlab*. The Language of Technical Computing. URL: <http://www.mathworks.com/products/matlab/> (last access: 31.05.2020).

155. *Investigation of the current state of isostatic graphite production technology* / A. Karvatskii, S. Leleka, A. Pedchenko, T. Lasariev // Technology audit and production reserves. 2017. № 2/1(34). P. 16–21. doi: 10.15587/2312-8372.2017.98125.

156. *Застосування САД-систем для розв'язання пружно-пластичних задач з врахуванням ізотропного зміцнення* / А. Я. Карвацкий, Т. В. Лазарев, С. В. Лелека, А. Ю. Педченко // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2017. № 7(1229). С. 55–63. doi:10.20998/2413-4295.2017.07.08.

157. *Solving nonlinear nonstationary problem of heat-conductivity by finite element method* / А. Ya. Karvatskii, А. Yu. Pedchenko // Вісник ПДТУ. Серія: Технічні науки. 2016. Вип. 32. С. 205–214.

158. *Numerical investigations of values contact electric resistance between the artifacts in Castner's furnace for distribution temperature fields in electrode columns* / A. Karvatskii, T. Lazariev, A. Pedchenko // Actual problems of modern technologies : book of abst. of the V Intern. scient. and techn. conf. of young researchers and stud., (Ternopil, 17th–18th of Nov. 2016.) / Ministry of Education and Science of Ukraine,

Ternopil Ivan Puluj National Technical Universtiy [and other.]. Ternopil : TNTU, 2016. P. 11–12.

159. *Алгоритм* зворотного відображення в розв'язанні задачах пружно-пластичності / А. Я. Карвацький, Т. В. Лазарєв, С. В. Лелека, А. Ю. Педченко // Проблеми техніки і технології переробних виробництв: зб. доп. III міжнар. наук.-практ. конф. 30–31 трав. 2017 р. / М-во освіти і науки України, Держ. вищ. навч. закл. «Донец. нац. технічн. ун-т.» та ін. Покровськ, ДВНЗ «ДонНТУ», 2017. С. 41–46.

160. *Улучшение* екологических показателей и эффективности работы вращающихся прокатных печей угольных материалов // С. С. Лобко, Г. М. Васильченко, С. В. Лелека, В. Ю. Щербина / матеріали XIX Міжн. наук.-практ. конф. Екологія, людина, суспільство (12–13 травня 2016 р.). Київ : НТУУ «КПІ», 2016. С. 104–106.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Перелік умовних позначень, символів і скорочень.....	5
1. Сучасний стан досліджень з технології виготовлення ізостатичного графіту	12
1.1. Застосування штучного графіту в сучасній техніці	12
1.2. Сучасний стан виробництва штучного графіту	16
1.3. Структурована будова штучного високодисперсного графіту та методи її дослідження	18
1.4. Особливості сучасної технологічної схеми отримання ізостатичного графіту	25
1.5. Перспективи світового виробництва ізостатичних графітових матеріалів	29
1.6. Концепція технологічного процесу отримання заготовок ізостатичного графіту	31
1.7. Висновки до розділу 1	31
2. Переділ пресування заготовок ізостатичного графіту	34
2.1. Сировинна база для отримання заготовок ізостатичного графіту. Раціональний склад коксопекової композиції.....	34
2.2. Вибір обладнання для тонкого подрібнення і класифікації наповнювача для отримання ізостатичного графіту. Регламент подрібнення наповнювача	35
2.3. Регламент підготовки преспорошку.....	38
2.4. Моделі формування коксопекових композицій у заготовки.....	40
2.5. Вимоги до пресованих заготовок. Регламент пресування заготовок	43
2.6. Фізичні властивості «зелених» заготовок з різним фракційним та матеріальним складом	44
2.7. Математична модель напружено-деформованого стану заготовок ізостатичного графіту	45
2.8. Раціональний склад пресової композиції та енергоефективний регламент її пресування	47
2.9. Вплив габаритних розмірів заготовок на склад преспорошку коксопекової композиції та регламент їх пресування.....	48
2.10. Висновки до розділу 2	51
3. Фізична, математична та числова моделі процесу переділу випалювання заготовок ізостатичного графіту	52
3.1. Визначення раціональних режимів випалювання заготовок ізостатичного графіту	52
3.2. Вибір пічного обладнання для випалювання заготовок ізостатичного графіту	56
3.3. Фізична і математична моделі процесу випалювання заготовок ізостатичного графіту в електропечах з викочуваним подом.....	57
3.4. Числова модель процесу випалювання заготовок ізостатичного графіту в електропечах з викочуваним подом.....	61
3.5. Верифікація числової моделі	63

3.6. Висновки до розділу 3	63
4. Фізична, математична та числова моделі процесу переділу графітування заготовок ізостатичного графіту	65
4.1. Вибір пічного обладнання для графітування заготовок ізостатичного графіту	65
4.2. Фізична модель печі прямого нагрівання	65
4.3. Математична модель процесу графітування заготовок	47
4.4. Методика числового розв'язання теплоелектричної задачі.....	71
4.5. Числова модель фізичних полів під час графітування заготовок	71
4.6. Верифікація числової моделі	72
4.7. Висновки до розділу 4.....	74
5. Числовий аналіз енергоефективних регламентів обладнання під час випалювання та графітування заготовок ізостатичного графіту.....	76
5.1. Вплив габаритних розмірів заготовок на технологічні регламенти їх випалювання.....	76
5.2. Дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів на процес прямого графітування заготовок у печах Кастнера	77
5.3. Вплив вмісту вологи в теплоізоляційному матеріалі на тепловий стан печі Кастнера.....	82
5.4. Вплив габаритних розмірів заготовок на технологічні регламенти їх графітування.....	83
5.5. Висновки до розділу 5.....	88
6. Дослідження раціональних характеристик заготовок ізостатичного графіту на переділах їх термооброблення	89
6.1. Схема і методика експериментальних досліджень процесу графітування великогабаритних заготовок ізостатичного графіту	89
6.2. Дані залежностей теплофізичних, механічних та електричних властивостей заготовок ізостатичного графіту на переділах випалювання і графітування.....	93
6.3. Висновки до розділу 6.....	95
7. Впровадження розроблених технічних рішень з технології виготовлення ізостатичного графіту	97
7.1. Технічне рішення з об'єднання процесів випалювання і графітування заготовок ізостатичного графіту	97
7.2. Енергоефективний регламент графітування заготовок ізостатичного графіту в печі Кастнера	98
7.3. Висновки до розділу 7.....	100
Висновки і рекомендації.....	101
Додатки	105
Додаток А. Відновлення теплофізичних властивостей сипких матеріалів за допомогою розв'язання оберненої задачі теплопровідності ...	105
Додаток Б. Неявний алгоритм розв'язання задач пружно-пластичності сипких матеріалів з використанням моделі Друкера–Прагера	112
Додаток В. Методика числового розв'язання нелінійної теплоелектричної задачі та результати її тестування	119
Перелік посилань	128

Наукове видання

Панов Євген Миколайович
Лелека Сергій Володимирович
Карвацький Антон Янович
Мікульонюк Ігор Олегович

ЕНЕРГОРЕСУРСОЕФЕКТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО ІЗОСТАТИЧНОГО ГРАФІТУ

Монографія

В авторській редакції

Підписано до друку 12.10.2020 р. Формат 60х84 1/16
Папір офс. 80 г/м². Друк цифровий. Умов. друк. арк. 8,19
Наклад 300 прим. Зам. № 0810

Видавництво: Інститут обдарованої дитини НАПН України
04053, вул. Січових Стрільців, 52-Д, м. Київ, Україна
тел./факс: (044) 481-27-16

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єкта видавничої справи
серія ДК No 6081 від 14.03.2018 р.